



**Hugo Borges dos
Santos Lopes**

Convivência de gerações em redes óticas PON



**Hugo Borges dos
Santos Lopes**

Convivência de gerações em redes óticas PON

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Dr. António Teixeira e Prof. Dr. Mário Lima, ambos do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática (DETI) e do Instituto de Telecomunicações (IT) da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, namorada e amigos por todo o seu incansável e incondicional apoio, e por me guiarem sempre na direção correta. Quero ainda dedicar este trabalho, em especial, ao meu eterno amigo Nuno Fernandes.

O Júri

Presidente	Prof. Doutor Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro Prof. Associado da Universidade de Aveiro
Vogal	Professor Doutor Alexandre de Almeida Prado Pohl Prof. Associado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
Orientador	Prof. Doutor António Luís Teixeira Prof. Associado da Universidade de Aveiro
Coorientador	Prof. Doutor Mário José Neves de Lima Prof. Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Esta tese marca o culminar do meu percurso académico na Universidade de Aveiro. Durante estes fantásticos anos, foram muitas as pessoas que me marcaram, incentivaram e que me ajudaram a desenvolver tanto a nível pessoal, como técnico, e como tal não posso deixar de lhes agradecer.

Quero agradecer aos meus orientadores, Prof. Dr. António Teixeira e Prof. Dr. Mário Lima pelo apoio, orientação e troca de conhecimentos, que me ajudaram a ultrapassar as dificuldades e a melhorar o meu trabalho.

Uma menção ainda para os colegas de laboratório pela paciência e cooperação, em especial Ali Shahpari e João Prata, uma vez que sem estes teria sido mais difícil ultrapassar alguns obstáculos.

A todos os meus amigos pelo acompanhamento e apoio constantes, o meu muito obrigado.

Quero também agradecer a minha namorada, Daniela Oliveira, pela sua paciência, compreensão e encorajamento.

Agradeço à Universidade de Aveiro, em particular ao Departamento de Eletrónica e Telecomunicações e Informática e ao Instituto de Telecomunicações, por me terem proporcionado uma experiência de vida que jamais esquecerei.

Por fim, o mais importante agradecimento, aos meus pais pela confiança depositada nas minhas capacidades ao longo da vida.

Acknowledgment

This thesis is the last step of my academic journey at the University of Aveiro. During these fantastic years, were many people who left a trace of themselves in my personality, encouraged and helped me improving myself, both personally and technically, and as such I must thank them.

I want to thank my advisors, Prof. Dr. António Teixeira and Prof. Dr. Mário Lima for their support, guidance and exchange of their knowledge, which help me to overcome my difficulties and to improve my work.

To all my classmates and friends, for their constant monitoring and support, thank you very much.

A mention also for laboratory colleagues for their patience and cooperation, especially to Ali Shahpari and João Prata, since without them it would have been harder to overcome some obstacles.

I want too, to thank my girlfriend Daniela Oliveira their patience, understanding and encouragement.

I thank to the University of Aveiro, in particular to the Department of Electronics, Telecommunications and Informatics and to the Telecommunications Institute, for giving me a life experience who I will never forget.

At last, but the most important acknowledgment, I want to thank to my parents for their belief in my capabilities throughout the life.

Palavras-chave

Redes Óticas Passivas, EPON, G-PON, XG-PON, RF *video overlay*, NG-PON, Efeitos lineares e não lineares, Raman, tecnologias NG-PON2, TWDM-PON, WDM-PON

Resumo

O tremendo crescimento da Internet e o consumo de novos conteúdos tem levado os operadores de telecomunicações a apostar fortemente nas redes óticas passivas de acesso. Esta aposta tem como objetivo atingir um maior número e diversidade de utilizadores, bem como aumentar a capacidade e alcance das redes existentes, e diminuir o seu custo. A intensificação dos trabalhos nesta área conduziu a um aumento das atividades de investigação nesta área, que levaram à criação de várias normas.

Ao longo desta dissertação os requisitos definidos nas normas G-PON, E-PON e XG-PON foram analisados, bem como foram apresentadas algumas das futuras alternativas. Foram também estudados e discutidos os requisitos de convivência entre as tecnologias atuais e as que futuramente se espera que sejam implementadas, bem como apresentados possíveis cenários de migração e coexistência.

De seguida, considerou-se um cenário de convivência entre todas as tecnologias atualmente normalizadas e analisou-se a viabilidade da utilização do espectro disponível na banda C para a utilização da tecnologia TWDM-PON. Dessa forma, efetuou-se um estudo laboratorial da interferência devida à dinâmica do efeito de difusão estimulada de Raman sobre o vídeo em ambientes de convivência com sinais NRZ e efetuaram-se simulações por forma a analisar a viabilidade da utilização dessa gama de comprimentos de onda.

Foram também realizados testes laboratoriais por forma a caracterizar os sistemas EPON e G-PON disponíveis no laboratório, bem como analisar a tecnologia XG-PON, efetuando-se uma correspondência com as suas normas. Por fim, foi testada experimentalmente a convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo.

Por último, foi realizado um teste da estabilidade do comprimento de onda de emissão de um laser sintonizável controlado por temperatura por forma a verificar a viabilidade da utilização deste controlo para tornar as ONUs sintonizáveis.

Keywords

Passive Optical Networks, EPON, G-PON, XG-PON, RF video overlay, NG-PON, Linear and nonlinear effects, Raman, technologies for NG-PON2, TWDM-PON, WDM-PON

Abstract

The tremendous growth of the Internet and new content consumption has led telecom operators to invest strongly in passive optical networks. This investment aims to achieve a greater number and diversity of potential users, as well as increase the capacity and reach of existing networks, and lower its cost. The intensification of the work in this area has led to the creation of many standards and has also intensified research in this area.

Along this dissertation the requirements defined in the standards Gigabit-capable Passive Optical Network (G-PON), Ethernet PON (EPON) and 10-Gigabit-capable PON (XG-PON) were analyzed, as well as were shown some of the future alternatives. Were also studied and discussed the requirements of coexistence between current technologies and the technologies that are expected to be implemented. Are also presented possible scenarios of migration and coexistence.

Next, it was considered a scenario of coexistence among all technologies currently standardized and was analyzed the feasibility of using the available spectrum in the C band for the use of the technology TWDM-PON. Thereby, it was performed a laboratory study of the impact caused by the dynamic component of Stimulated Raman Scattering on the video signal in coexistence with NRZ signals. Simulations were also performed in order to examine the feasibility of using this available range of wavelengths.

Laboratory tests were also performed in order to characterize the systems EPON and G-PON available in the lab, as well as it was analyzed the XG-PON technology, making up a correspondence with its standards. It was also tested experimentally the coexistence of G-PON, XG-PON and video.

Finally, it was performed a test of the stability of the emission wavelength of a tunable laser controlled by temperature in order to verify the feasibility of using this control to make the ONUs tunable.

Índice

Índice	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
1.4 Principais Contribuições.....	4
2 Estado da Arte.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Redes Óticas Passivas (PON)	5
2.3 Ethernet PON (EPON).....	7
2.3.1 Arquitetura	7
2.3.2 Características Técnicas	7
Bit Rate	7
Código de Linha	7
Alcance físico	7
Split Ratio.....	7
Gama de comprimentos de onda de trabalho.....	8
Correção de erros	8
2.3.3 Transmissão EPON	8
2.3.3.1 Transmissão de tráfego Downstream e Upstream	8
2.3.3.2 Ranging.....	9
2.3.3.3 Processo descoberta automática (Auto Discovery)	10
2.4 <i>Gigabit-capable Passive Optical Network (G-PON)</i>	11
2.4.1 Arquitetura	11
2.4.2 Características Técnicas	12
Bit Rate	12
Código de Linha	12
Alcance físico	12
Split Ratio.....	13
Gama de comprimentos de onda de trabalho.....	13
Correção de erros	13
2.4.3 Transmissão G-PON	14
2.4.3.1 Transmissão de tráfego Downstream e Upstream	14
2.4.3.2 Ranging.....	14
2.4.3.3 Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA)	15
2.4.3.4 Método de encapsulamento de dados G-PON	15

2.4.4	Questões de convivência G-PON	16
2.5	<i>Next-Generation Passive Optical Networks (NG-PON)</i>	19
2.5.1	Introdução	19
2.5.2	NG-PON Roadmap	20
2.6	<i>10-Gigabit-capable Passive Optical Network (XG-PON)</i>	20
2.6.1	Arquitetura	20
2.6.2	Características Técnicas	22
	Bit Rate	22
	Código de Linha	22
	Alcance.....	22
	Split Ratio.....	23
	Gama de comprimentos de onda de trabalho.....	23
	Correção de erros	24
2.6.3	Requisitos do Sistema XG-PON	24
2.6.3.1	Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA)	24
2.6.4	Cenários de migração	24
2.6.5	Questões de convivência XG-PON	26
2.7	NG-PON2	28
2.7.1	Tecnologias candidatas para NG-PON2	29
2.7.1.1	TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed-PON).....	29
2.7.1.2	WDM-PON (Wavelength Division Multiplexed - PON).....	33
2.8	<i>RF Video Overlay</i>	37
2.8.1	Televisão Digital	38
2.8.2	DVB-S	39
2.8.3	DVB-C	40
2.8.4	DVB-T	41
3	Estudo da interferência devida à dinâmica do efeito de Difusão Estimulada de Raman (SRS – Stimulated Raman Scattering) sobre o vídeo em ambientes de convivência com sinais NRZ	43
3.1	Introdução.....	43
3.2	Difusão Estimulada de Raman (SRS)	44
3.2.1	Interação com um sinal de bombeio modulado	46
3.3	Aproximação Teórica	47
3.4	Montagem experimental	49
3.5	Resultados obtidos	50
3.6	Conclusões	55
4	Resultados Laboratoriais e de Simulação.....	57
4.1	Caracterização sistemas EPON e G-PON	57
4.1.1	Caracterização de sistema EPON	58
4.1.1.1	Taxa de Linha Máxima das ONUs	59
4.1.1.2	Máximo Power Budget.....	62
4.1.1.3	Máximo alcance	63

4.1.2	Caracterização de sistema G-PON	64
4.1.2.1	Taxa de Linha Máxima das ONUs	65
4.1.2.2	Máximo Power Budget.....	68
4.1.2.3	Máximo alcance	70
4.2	Teste sistema XG-PON.....	71
4.2.1	Máximo <i>Power Budget</i> de <i>Downstream</i>	71
4.2.2	Máximo <i>Power Budget</i> de <i>Upstream</i>	73
4.3	Teste convivência G-PON, XG-PON e Vídeo	74
4.3.1	Montagem experimental	74
4.3.2	Resultados experimentais.....	77
4.4	Simulação de cenário de convivência entre G-PON, XG-PON, vídeo e TWDM	79
4.4.1	Resultados obtidos	80
4.4.2	Conclusões	83
4.5	TWDM – Teste da estabilidade do comprimento de onda de emissão para laser sintonizável controlado por temperatura	84
5	Conclusões e Trabalho Futuro	87
5.1	Conclusões	87
5.2	Trabalho Futuro	89
Anexo A.	Efeitos lineares e não lineares.....	91
A.1.	Introdução.....	91
A.2.	Efeitos lineares.....	91
A.2.1.	Atenuação.....	91
A.2.2.	Dispersão	93
A.2.2.1.	Dispersão cromática.....	93
A.3.	Efeitos não lineares	94
A.3.1.	Auto Modulação de Fase (SPM).....	94
A.3.2.	Modulação de Fase Cruzada (XPM)	96
A.3.3.	Mistura de Quatro Ondas (FWM)	97
A.3.4.	Difusão Estimulada de Raman (SRS)	99
A.3.5.	Difusão Estimulada de Brillouin (SBS).....	99
Referências	101

Lista de Figuras

Figura 2.2.1 – Arquitetura típica de uma rede PON [6]	6
Figura 2.3.1 – Tráfego <i>Downstream</i> EPON [8]	8
Figura 2.3.2 – Tráfego <i>Upstream</i> EPON [8]	9
Figura 2.3.3 – Processo <i>Ranging</i> [8]	9
Figura 2.3.4 – Processo <i>Auto Discovery</i> [8]	10
Figura 2.4.1 – Diagrama esquemático de uma rede G-PON [9]	11
Figura 2.4.2 – Diferentes arquiteturas de uma rede G-PON [10]	11
Figura 2.4.3 – Alocação de comprimentos de onda G-PON	13
Figura 2.4.4 – Transmissão do tráfego em <i>downstream</i> [15]	14
Figura 2.4.5 – Transmissão do tráfego em <i>upstream</i> [15]	14
Figura 2.4.6 – Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA) [8]	15
Figura 2.4.7 – Banda de comprimento de onda de <i>upstream</i> G-PON [16]	16
Figura 2.4.8 – Bandas de comprimento de onda de G-PON <i>downstream</i> , vídeo e NGA [16]	17
Figura 2.4.9 – Tolerância X/S de modo que o limite da sensibilidade do recetor G-PON não seja ultrapassado [16]	17
Figura 2.4.10 – Gamas de comprimentos de onda de funcionamento para o caso coexistência de G-PON, NGA e vídeo [16]	18
Figura 2.4.11 – Exemplo de características de isolamento de filtro de vídeo [16]	18
Figura 2.4.12 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência G-PON com serviços adicionais..	19
Figura 2.5.1 – NG-PON <i>Roadmap</i> [18]	20
Figura 2.6.1 – Diferentes arquiteturas de uma rede XG-PON [19]	21
Figura 2.6.2 – Arquiteturas suportadas por uma rede XG-PON [19]	22
Figura 2.6.3 – Implementação genérica G-PON [19]	23
Figura 2.6.4 – Opções da arquitetura de divisão XG-PON [19]	23
Figura 2.6.5 – Alocação de comprimentos de onda XG-PON no caso de coexistência entre XG-PON, G-PON e Vídeo	24
Figura 2.6.6 – Cenário de migração G-PON para XG-PON [19]	25
Figura 2.6.7 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência XG-PON com serviços adicionais [19]	27
Figura 2.6.8 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência XG-PON com serviços adicionais..	27
Figura 2.7.1 – Arquitetura de um sistema TWDM-PON [22]	29
Figura 2.7.2 – Comprimentos de onda de trabalho: Reutilização de comprimentos de onda XG-PON [22]	30
Figura 2.7.3 – Comprimentos de onda de trabalho: Redefinição da banda C [22]	31
Figura 2.7.4 – Cenário de migração e coexistência (Opção 1): Reutilização de comprimentos de onda XG-PON	32
Figura 2.7.5 – Cenário de migração e coexistência (Opção 2): Redefinição da banda C	32
Figura 2.7.6 – Arquitetura abstrata WDM-PON	33
Figura 2.7.7 – Arquitetura WDM PON: Classe <i>Wavelength-Routed</i>	34
Figura 2.7.8 – Arquitetura WDM PON: Classe <i>Wavelength-Selected</i>	34
Figura 2.7.9 – Dispositivo AWG [26]	35
Figura 2.7.10 – Comprimentos de onda de operação para tecnologia WDM-PON em cenários convivência	36
Figura 2.7.11 – Convivência entre as tecnologias G-PON/XG-PON, WDM-PON e Vídeo	37
Figura 2.8.1 – (a) Resposta em frequência; (b) resposta temporal; do Filtro cosseno elevado para três valores do fator de <i>roll-off</i> (0.2, 0.35 e 0.5)[32]	40
Figura 3.2.1 – Níveis de energia que participam no processo de SRS [37]	44
Figura 3.2.2 – O efeito de SRS. A potência de canais de menor comprimento de onda é transferida para os canais de maior comprimento de onda [39]	44
Figura 3.2.3 – Espectro do ganho de Raman para fibras de sílica [37]	45
Figura 3.2.4 – Esquema ilustrativo do efeito de SRS sobre dois sinais modulados [43]	47
Figura 3.4.1 – Montagem experimental utilizada para teste do <i>crosstalk</i> imposto num canal CW devido à sua interação com um canal NRZ	49
Figura 3.4.2 – Montagem experimental utilizada para teste do <i>crosstalk</i> imposto num canal CW devido à sua interação com quatro canais NRZ espaçados de 50, 100 e 200 GHz	50
Figura 3.5.1 – <i>Crosstalk</i> induzido por SRS para várias potências de um canal NRZ a 10Gbps	51
Figura 3.5.2 – <i>Crosstalk</i> induzido por SRS na gama de frequências CATV para um canal NRZ a 2.5Gbps	51
Figura 3.5.3 – <i>Crosstalk</i> induzido por SRS para quatro canais NRZ a 2.5Gbps espaçados de 50GHz	52

Figura 3.5.4 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 2.5Gbps espaçados de 100GHz	52
Figura 3.5.5 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 2.5Gbps espaçados de 200GHz	53
Figura 3.5.6 – Crosstalk induzido por SRS na gama de frequências CATV para um canal NRZ a 10Gbps	53
Figura 3.5.7 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 10Gbps espaçados de 50GHz	53
Figura 3.5.8 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 10Gbps espaçados de 100GHz	54
Figura 3.5.9 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ espaçados a 10Gbps de 200GHz	54
Figura 4.1.1 – Esquema da ligação do equipamento IXIA com o sistema a testar	57
Figura 4.1.2 – (a) OLT EPON (OLT-AN5116-02) (b) ONU EPON (ONU-AN5066-074)	58
Figura 4.1.3 – Montagem experimental para teste da velocidade máxima das ONUs (a) <i>Downstream</i> (b) <i>Upstream</i>	60
Figura 4.1.4 – PER em função da taxa de linha para diferentes <i>power budgets</i> - Sentido <i>downstream</i>	61
Figura 4.1.5 – PER em função da taxa de linha para diferentes <i>power budgets</i> - Sentido <i>upstream</i>	61
Figura 4.1.6 – Montagem experimental para teste do máximo <i>power budget</i> : (a) <i>Downstream</i> (b) <i>Upstream</i> ..	62
Figura 4.1.7 – PER em função do <i>power budget</i> de <i>downstream</i>	62
Figura 4.1.8 – PER em função do <i>power budget</i> de <i>upstream</i>	63
Figura 4.1.9 – Montagem experimental para teste do máximo alcance do sistema EPON	64
Figura 4.1.10 – PER em função do comprimento de fibra do sistema	64
Figura 4.1.11 – OLT GPON (OLT7-8CH)	64
Figura 4.1.12 – ONUs G-PON (ONT7RF1GE)	65
Figura 4.1.13 – PER em função da taxa de linha para diferentes <i>power budgets</i> – <i>Downstream</i> (Uma ONU)	66
Figura 4.1.14 – PER em função da taxa de linha para diferentes <i>power budgets</i> – <i>Downstream</i> (Duas ONU)	67
Figura 4.1.15 – PER em função da taxa de linha para diferentes <i>power budgets</i> – <i>Upstream</i> (Uma ONU)	67
Figura 4.1.16 – PER em função da taxa de linha para diferentes <i>power budgets</i> – <i>Upstream</i> (Duas ONUs)	68
Figura 4.1.17 – PER em função do <i>power budget</i> de <i>downstream</i> – Duas ONUs	69
Figura 4.1.18 – PER em função do <i>power budget</i> de <i>upstream</i> – Duas ONUs	69
Figura 4.1.19 – PER em função do comprimento de fibra do sistema	70
Figura 4.2.1 – Montagem experimental de sistema XG-PON – <i>Downstream</i>	71
Figura 4.2.2 – BER em função do <i>Power Budget</i> de <i>Downstream</i>	71
Figura 4.2.3 – Diagrama de olho para 20 Km e 11.5 dB de <i>power budget</i>	72
Figura 4.2.4 – Diagrama de olho para 20 Km e 19 dB de <i>power budget</i>	72
Figura 4.2.5 – Diagrama de olho para 20 Km e 26 dB de <i>power budget</i>	73
Figura 4.2.6 – Montagem experimental de sistema XG-PON – <i>Upstream</i>	74
Figura 4.2.7 – BER em função do <i>Power Budget</i> de <i>Upstream</i>	74
Figura 4.3.1 – Montagem experimental de cenário de convivência entre os sistemas G-PON, XG-PON e Vídeo	75
Figura 4.3.2 – Banda de passagem da porta 1550nm do Triplexer	76
Figura 4.3.3 – Banda de passagem da porta de 1551nm (esquerda) e 1571nm (direita) do 4-CWDM Demux ...	76
Figura 4.3.4 – Espectro ótico na entrada da fibra ótica	77
Figura 4.3.5 – PER de <i>downstream</i> e <i>upstream</i> do sistema G-PON em convivência com Vídeo e XG-PON	77
Figura 4.3.6 – Diagramas de olho para cenário <i>back-to-back</i> (esquerda) e cenário de convivência (direita)	78
Figura 4.3.7 – Espectro do sinal de vídeo (DVB-C) recebido	78
Figura 4.4.1 – <i>Setup</i> utilizado para estudo do efeito de introdução da tecnologia TWDM num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo	79
Figura 4.4.2 – Espectro ótico na entrada da fibra ótica	81
Figura 4.4.3 – Espectro dos canais DVB-C na entrada da fibra ótica	81
Figura 4.4.4 – Espectro dos canais DVB-C após fotodíodo	82
Figura 4.4.5 – CNR dos canais DVB-C (256-QAM) para cenários de convivência (GPON 0 dBm @1490nm, XG-PON 11dBm @1577nm, Vídeo 17dBm @1555nm, TWDM 11dBm @1529.55nm, 1531.12nm, 1532.66nm, 1534.25nm)	83
Figura 4.5.1 – Variação dos comprimentos de onda do laser em função da temperatura da câmara térmica ...	84
Figura 4.5.2 – Caracterização OADM de 100 GHz correspondente ao canal 23 do <i>grid</i> ITU (1551.72 nm)	85
Figura A.2.1 – Perdas devidas a atenuação em função do comprimento de onda para fibra standard SMF e fibra <i>zero water peak</i> [8]	92
Figura A.2.2 – Coeficiente de dispersão em função do comprimento de onda numa fibra SMF [2]	94
Figura A.3.1 – Variação temporal do desfaseamento de frequência causado por SPM num pulso Gaussiano [50]	96
Figura A.3.2 – Número de possíveis termos devidos a FWM em relação ao número de canais [51]	98
Figura A.3.3 – Termos devidos ao efeito de FWM para três canais igualmente espaçados na frequência [51] ..	99

Lista de Tabelas

Tabela 2.4.1 – Serviços fornecidos pelas diferentes arquiteturas G-PON [10].....	12
Tabela 2.4.2 – Taxas de transmissão G-PON [11]	12
Tabela 2.4.3 – Opções para a gama de comprimentos de onda de <i>upstream</i> G-PON [16]	16
Tabela 2.4.4 – Opções de gamas de comprimentos de onda para NGA [16]	17
Tabela 2.6.1 – Serviços fornecidos pelas diferentes arquiteturas XG-PON [19]	21
Tabela 2.6.2 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência XG-PON com serviços adicionais [19]	26
Tabela 3.5.1 – Lista de parâmetros utilizada na determinação dos valores teóricos do <i>crosstalk</i>	50
Tabela 4.1.1 – Características OLT EPON.....	59
Tabela 4.1.2 – Características ONU EPON	59
Tabela 4.1.3 – Características do <i>triplexer</i>	60
Tabela 4.1.4 – Características OLT G-PON	65
Tabela 4.1.5 – Características ONU G-PON.....	65
Tabela 4.3.1 – Caracterização 4-Demux CWDM	76
Tabela 4.4.1 – Resultados obtidos para as tecnologias de dados	82
Tabela 4.4.2 – Resultados obtidos para canais de vídeo - DVB-C (256QAM)	82

Lista de Acrónimos

A

APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Gratings</i>

B

BER	<i>Bit Error Rate</i>
BERT	<i>BER Tester</i>

C

CATV	<i>Cable Television</i>
CNR	<i>Carrier-to-Noise Ratio</i>
CO	<i>Central Office</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
CWDM	<i>Coarse WDM</i>

D

DBA	<i>Dynamic Bandwidth Allocation</i>
DBS	<i>Direct Broadcasting Satellite</i>
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>
DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>
DVB-C	<i>Digital Video Broadcasting-Cable</i>
DVB-S	<i>Digital Video Broadcasting-Satellite</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting-Terrestrial</i>
DWDM	<i>Dense WDM</i>

E

ECL	<i>External Cavity Laser</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EPON	<i>Ethernet PON</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>

F

FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FTTB	<i>Fiber To The Building</i>
FTTC	<i>Fiber to the Cell</i>
FTTCab	<i>Fiber To The Cabinet</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
FTTO	<i>Fiber To The Office</i>
FSAN	<i>Full Service Access Network</i>
FWM	<i>Four-wave mixing</i>

G

G-PON	<i>Gigabit-capable PON</i>
-------	----------------------------

H

HDTV	<i>Televisão de alta definição</i>
-------------	------------------------------------

I

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union-Telecommunication</i>

L

LLID	<i>Logical Link ID</i>
------	------------------------

M

Mbps	<i>Megabits por segundo</i>
MDU	<i>Multi-Dwelling Units</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>

N

NGA	<i>Next Generation Access</i>
NG-PON	<i>Next-Generation Passive Optical Networks</i>
NRZ	<i>Non Return to Zero</i>

O

OADM	<i>Optical Add Drop Multiplexers</i>
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>
OKE	<i>Optical Kerr Effect</i>
OLT	<i>Optical Line Termination</i>
ONA	<i>Optical Network Analyser</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyser</i>

P

PC	<i>Polarization Controller</i>
PDL	<i>Polarization Dependent Loss</i>
PON	<i>Redes Óticas Passivas</i>
POTS	<i>Plain Old Telephone Service</i>
PRBS	<i>Pseudorandom binary sequence</i>

Q

QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QDB	<i>Quadrature Duobinary</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>

R

RF	<i>Radio Frequency</i>
RoF	<i>Radio over Fiber</i>
RSOA	<i>Reflexive Semiconductor Optical Amplifier</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>

S

SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SCM	<i>Sub-Carrier multiplexing</i>
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>
SMF	<i>Single-Mode Fiber</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>

T

TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TEC	<i>Thermoelectric cooler</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TWA	<i>Travelling Wave Amplifier</i>
TWDM-PON	<i>Time and Wavelength Division Multiplexed-PON</i>

V

VOA	<i>Variable Optical Attenuator</i>
VoD	<i>Video on Demand</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>

W

WBF	<i>Wavelength Blocking Filters</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WR	<i>Wavelength-Routed</i>
WS	<i>Wavelength-Selected</i>

X

xDSL	<i>Digital Subscriber Line technologies</i>
XG-PON	<i>10-Gigabit-capable Passive Optical Network</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>
XPM-TS	<i>Cross-Phase Modulation Combined with Transmission Slope</i>

Z

ZWP	<i>Zero Water Peak</i>
-----	------------------------

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Desde o início dos seus tempos que a espécie humana tem necessidade de comunicar e de transmitir informação de um local para outro, tanto para distâncias de apenas alguns quilómetros como para distâncias transatlânticas. Devido ao tremendo crescimento da Internet, tanto em número utilizadores como em largura de banda disponível para cada utilizador, tornou-se necessário para os operadores de telecomunicações possuir redes com maior capacidade e maior alcance.

Nos últimos anos, as redes de acesso têm sofrido também um crescimento na oferta de serviços, tanto no sentido *upstream* como no *downstream*. Alguns exemplos desses serviços são o IPTV (*downstream*), as redes sociais e *websites* de conteúdos gerados pelo utilizador (*upstream*). [1]

O IPTV exige elevada largura de banda devido aos diversos formatos existentes, que possuem cada vez maior qualidade, como é exemplo da televisão de alta definição (HDTV). Com o decorrer dos anos a evolução do IPTV será afetada pelos codecs de vídeo para suportar HDTV, Ultra HDTV e 3DTV, que exigem largura de banda que não pode ser fornecida pelas tradicionais redes de acesso. Também as redes sociais, onde os utilizadores são incentivados a partilhar dados, têm vindo a aumentar as exigências de largura de banda especialmente no sentido *upstream*. Além destes, os serviços de *web browsing*, correio eletrónico e chamadas VoIP requerem também parte da largura de banda disponível. [1]

Esta incessante necessidade de largura de banda por parte dos utilizadores criou uma procura de largura de banda tal, que as tecnologias baseadas em cobre atingiram os seus limites. Enquanto isso, os custos dos componentes fotónicos foram reduzindo, e tornando as arquiteturas de redes óticas passivas uma solução cada vez mais atrativa devido à elevada largura de banda e à baixa atenuação que é possível providenciar através da utilização de fibras óticas. Desta forma, várias arquiteturas e tecnologias têm sido estudadas pela indústria de telecomunicações, e algumas normas PON (Redes Óticas Passivas) têm sido aprovadas tanto pela ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication*), como pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). [2]

No entanto, as tecnologias PON existentes atualmente, G-PON (*Gigabit-capable PON*) e EPON (*Ethernet PON*), devido ao aumento quase contínuo na demanda por largura de banda por parte dos subscritores, deixarão num curto espaço de tempo de ser capazes de satisfazer as necessidades dos mesmos. Assim, por forma a criarem soluções para a possível sobrecarga de largura de banda, os grupos de padronização continuaram a estudar e regulamentar as redes óticas passivas de próxima geração (NG-PON) para substituir ou complementar as tecnologias PON já existentes. Além disso, devido ao facto de estas novas tecnologias permitirem providenciar uma maior largura de banda, maior alcance e suportar um maior número de clientes, pretendem minimizar as despesas de capital e os custos operacionais das suas redes de acesso. [3] Assim, e em resposta a estas necessidades, o grupo FSAN (*Full Service Access Network*)

em conjunto com o ITU-T, desenvolveu também uma nova arquitetura de acesso, XG-PON (*10-Gigabit-capable Passive Optical Network*), que permite a coexistência com G-PON e contribui também para o aumento da vida útil dos sistemas TDMA (*Time Division Multiple Access*) PON.

No entanto, devido à mudança de serviços de vídeo de *broadcast* para *unicast* e devido à crescente difusão de aplicações multimédia de alta qualidade, novas soluções capazes de suportar taxas de transmissão superiores a 1 Gbps por utilizador já são alvo de atividades de investigação. Outros fatores importantes para a próxima geração de redes de acesso são também a existência de uma plataforma única para todo o tipo de aplicações e a minimização dos equipamentos ativos por forma a minimizar os custos operacionais das redes. Desta forma, foram definidos requisitos para NG-PON2 para que esta tecnologia suporte também o crescimento de largura de banda devido à evolução dos serviços de vídeo, que se estima que em 2014 representarão cerca de 90% do tráfego global. Esta segunda fase é ainda alvo de bastante investigação, sendo bastantes as tecnologias candidatas a ser adotadas para NG-PON2, tais como são os casos das tecnologias TWDM-PON (*Time and Wavelength Division Multiplexed-PON*) e WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexed – PON*). [4] [5]

Assim, na presente dissertação pretende-se estudar as tecnologias existentes e estudar os requisitos de convivência entre estas e as que se pretendem implementar num futuro próximo. Pretende-se também efetuar o estudo de cenários de convivência de cada tecnologia com tecnologias anteriores, bem como analisar a ocupação do espectro atual e verificar a viabilidade da utilização das bandas disponíveis para as tecnologias candidatas a NG-PON2.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos:

- Estudo das normas das redes de acesso para distribuição do sinal de G-PON, EPON, XG-PON e vídeo.
- Estudo de tecnologia candidata a NG-PON2: TWDM-PON.
- Estudo dos cenários de convivência de cada tecnologia com tecnologias anteriores e análise da ocupação espectral.
- Caracterização de sistemas EPON e G-PON em termos de: taxa de linha máxima, máximo power budget e máximo alcance.
- Caracterização de sistema XG-PON em termos de máximo power budget.
- Estudo de cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e Vídeo.
- Estudo da viabilidade da utilização da gama disponível na banda C para utilização da tecnologia TWDM através de um estudo da dinâmica do efeito de Difusão Estimulada de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) sobre o vídeo em ambientes de convivência com sinais NRZ
- Estudo das interações adicionais que a adição da tecnologia TWDM introduz num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo através da utilização do simulador VPI Systems.

- Teste da viabilidade de controlo do comprimento de onda de emissão de laser através da utilização de controlo por temperatura para possível utilização na tecnologia TWDM por forma a tornar a ONU sintonizável.

1.3 Estrutura

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos:

- Introdução
- Estado da Arte
- Estudo da interferência devida à dinâmica do efeito de Difusão Estimulada de Raman (SRS) sobre o vídeo em ambientes de convivência com sinais NRZ
- Resultados Laboratoriais e de Simulação
- Conclusões e trabalho futuro

Neste primeiro capítulo efetua-se o enquadramento, apresentam-se os objetivos e contribuições do trabalho, e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo são apresentadas as normas para redes de acesso disponíveis atualmente e as que se pretendem implementar num futuro próximo. São também apresentados os requisitos para NG-PON2, bem como as tecnologias candidatas a ser adotadas. Ao longo deste capítulo, após a apresentação de cada norma, são estudados os seus requisitos e discutidas questões de convivência e possíveis cenários de migração e coexistência. Por fim, é apresentada a tecnologia RF *Video Overlay* e uma descrição das normas para a transmissão de vídeo digital.

No terceiro capítulo é efetuado um estudo do efeito dinâmico de SRS, apresentado este efeito não linear, bem como o modelo teórico utilizado no âmbito desta dissertação. É ainda apresentada a montagem experimental utilizada para o estudo do mesmo e os resultados obtidos. Por fim, de acordo com os resultados obtidos, retiraram-se conclusões relativamente à dependência deste efeito da potência, número de canais presentes, espaçamento entre canais, comprimentos de onda e taxa de transmissão dos mesmos.

No quarto capítulo são apresentados resultados experimentais obtidos tendo em vista a caracterização de sistemas EPON e G-PON disponíveis no laboratório, por forma a verificar as suas características e requisitos quando em comparação com as respetivas normas. Neste capítulo, foi também efetuado um teste que teve como objetivo a caracterização de um sistema XG-PON em termos de máximo *power budget*. Foi também efetuado um teste de convivência entre os sistemas G-PON, XG-PON e vídeo. Neste capítulo são ainda estudadas as interações adicionais que a adição da tecnologia TWDM introduz num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo. Para efetuar este estudo, foram efetuadas simulações de sistemas através da utilização do *software* VPI Systems. Por fim, foi efetuado um estudo relativo à viabilidade de controlo do comprimento de onda de emissão de laser, através da utilização de controlo por temperatura, para possível utilização na tecnologia TWDM por forma a tornar a ONU sintonizável.

No último capítulo são apresentadas as conclusões e sugeridos possíveis trabalhos que possam ser desenvolvidos nesta área.

Por fim, nos anexos são apresentados os principais efeitos lineares e não lineares presentes em fibras óticas. Este capítulo serve de base para alguns comentários e conclusões efetuadas ao longo desta dissertação.

1.4 Principais Contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições deste trabalho podem ser agrupadas da seguinte forma:

- Descrição dos principais aspetos das redes atuais e das que se pretendem implementar num futuro próximo, tais como: G-PON, EPON, XG-PON, RF *Video Overlay*;
- Estabelecer requisitos de cada norma e fatores limitativos relativos à convivência entre várias tecnologias;
- Explicitar as características potenciais das tecnologias candidatas a NG-PON2: WDM-PON e TWDM-PON;
- Estudar questões de convivência de cada tecnologia e de possíveis cenários de convivência;
- Realizar um estudo do efeito dinâmico de SRS, por forma a serem retiradas algumas conclusões relativamente à viabilidade da utilização da gama disponível na banda C para utilização da tecnologia TWDM;
- Caracterizar um sistema EPON em termos de: taxa de linha máxima, máximo power budget e máximo alcance por forma a verificar as suas características e requisitos quando em comparação com a respetiva norma;
- Caracterizar um sistema G-PON em termos de: taxa de linha máxima, máximo power budget e máximo alcance por forma a verificar as suas características e requisitos quando em comparação com a respetiva norma;
- Caracterizar um sistema XG-PON em termos de máximo *power budget*;
- Demonstrar a possibilidade de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo;
- Realizar um estudo das interações adicionais que a adição da tecnologia TWDM introduz num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo através de resultados de simulações;
- Testar a viabilidade da utilização de controlo por temperatura para controlo do comprimento de emissão de laser, por forma a poder ser utilizado em ONUs sintonizáveis na tecnologia TWDM.

2 Estado da Arte

2.1 Introdução

Neste primeiro capítulo são revistas as razões pelas quais uma arquitetura de redes óticas passivas assume tão grande importância para os operadores de telecomunicações. De seguida, são apresentadas as principais características das tecnologias que se encontram já largamente implantadas e que utilizam tais arquiteturas: G-PON e EPON.

Devido a esta implantação massiva das redes PON e incessante necessidade de largura de banda por parte dos utilizadores, serão também apresentados os sistemas PON que fornecem o caminho para a evolução das tecnologias PON existentes atualmente. Uma vez que se acredita que NG-PON será o desenvolvimento natural da norma G-PON, dado que preenche todos os requisitos especificados e permite a coexistência com as tecnologias existentes atualmente, é também apresentado o caminho de evolução da próxima geração de redes óticas passivas (NG-PON) e as principais características das tecnologias candidatas a serem adotadas em cada uma das suas duas fases de evolução: XG-PON para a primeira fase e TWDM-PON ou WDM-PON para a segunda fase. Por fim, é efetuada a apresentação da tecnologia RF *Video Overlay* e uma descrição das normas para a transmissão de vídeo digital.

Neste capítulo, após a apresentação das tecnologias, foi também efetuada uma análise relativa à convivência das tecnologias apresentadas com as tecnologias existentes, procedendo-se à verificação dos cenários possíveis de coexistência, análise da ocupação do espectro e apresentação de cenários de migração para cada tecnologia.

2.2 Redes Óticas Passivas (PON)

Uma das decisões mais importantes em qualquer negócio envolve a compra de bens de equipamento. Como tal, os operadores de telecomunicações pretendem minimizar os custos de implementação da sua rede de acesso, de modo a maximizar as receitas provenientes da oferta de serviços. Desta forma, a decisão mais importante de um operador é feita aquando da aquisição dos equipamentos de rede, de modo a encontrar um equilíbrio entre o custo e a largura de banda. As redes óticas passivas são apenas uma das várias tecnologias de acesso utilizadas atualmente, apresentando neste momento uma penetração cada vez mais significativa no mercado atual das redes de acesso. Tal como o próprio nome indica, não existem componentes ativos entre o *Central Office* (CO) e a residência do cliente, sendo que os dispositivos ativos apenas existem nesses dois locais.

A Figura 2.2.1 ilustra a arquitetura típica de uma PON.

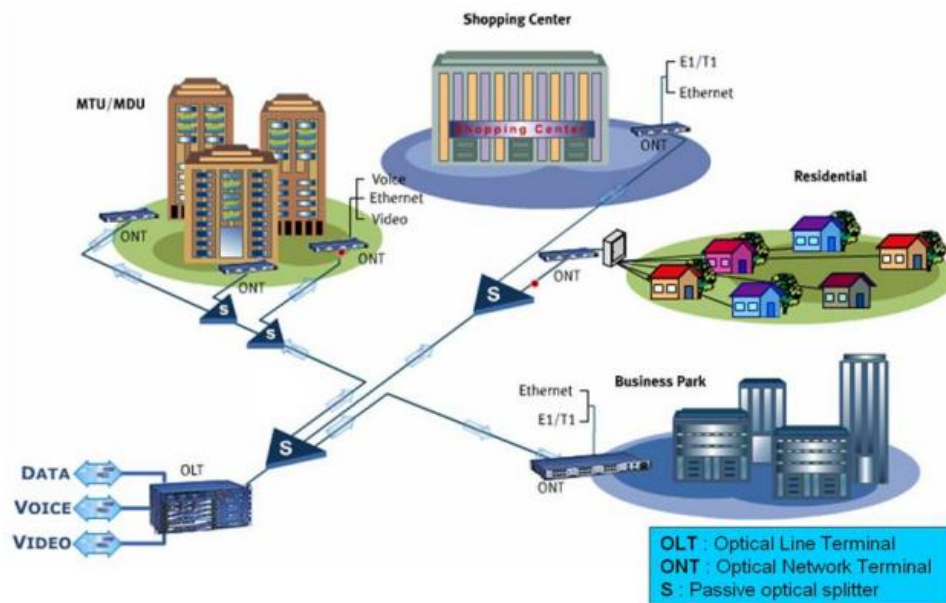


Figura 2.2.1 – Arquitetura típica de uma rede PON [6]

Desde o CO, uma fibra ótica monomodo (*feeder fiber*) segue até um *splitter* ótico passivo 1:N que está localizado entre a *Optical Line Termination* (OLT) e as residências dos utilizadores. As portas de saída deste *splitter* passivo, por sua vez, ligam à ONT (*Optical Network Terminal*) através de fibras monomodo individuais (fibras de distribuição). A ONT, também designada por *Optical Network Unit* (ONU), pode estar localizada numa casa, escritório, gabinete de rua, variando a designação da rede consoante o local em que esta se encontra: *fiber-to-the-home/office/business/neighborhood/curb/user/premises/node*. Quando se pretendem referir todas as designações anteriores, utiliza-se a designação de FTTx.

O conjunto destas fibras e componentes óticos passivos que se encontram entre o CO e as residências dos assinantes são usualmente designados como a rede de distribuição ótica (ODN, *Optical Distribution Network*). Além disso, uma PON é caracterizada também pela utilização de *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), que permite a multiplexagem de várias portadoras óticas numa única fibra ótica através da utilização de diferentes comprimentos de onda. A utilização de WDM permite também um fluxo de dados bidirecional através de uma única fibra ótica.

Assim, as PON têm como vantagem o facto de os operadores de rede poderem reduzir substancialmente as suas necessidades de fornecimento energético fora do CO, uma vez que não necessitam de instalar nem manter ativos os componentes na rede de acesso, como caso utilizassem um DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) ou um switch Ethernet. Além disso, as PONs permitem a partilha de uma única interface ótica na OLT entre vários clientes, permitindo por isso minimizar os requisitos de espaço no CO. Permitem ainda menores custos operacionais e uma maior fiabilidade.

2.3 Ethernet PON (EPON)

2.3.1 Arquitetura

Sendo uma rede de acesso do tipo PON, a arquitetura típica EPON segue os seus moldes. Como tal, numa rede E-PON os únicos equipamentos ativos são a OLT e as ONUs. Desde o CO, uma fibra ótica monomodo liga-se a um splitter ótico 1:N, e as portas de saída deste ligam aos assinantes através de fibras monomodo individuais. Além disso, utiliza WDM para a multiplexagem de várias portadoras óticas numa única fibra ótica através da utilização de diferentes comprimentos de onda, permitindo um fluxo de dados bidirecional através de uma fibra ótica.

2.3.2 Características Técnicas

Bit Rate

A norma EPON define especificações para a camada física 1000BASE-PX10 e 1000BASE PX20. A taxa de transmissão utilizada para ambos os casos é de 1.25 Gbps tanto no sentido *downstream*, como no sentido *upstream*. [7]

Código de Linha

A norma EPON utiliza uma codificação de linha 8b/10b que assegura que há suficientes transições de bit de forma a manter o balanceamento DC. Isto permite que o recetor possa ser mais barato e permite assegurar uma recuperação do relógio mais fácil. [2] [7]

No entanto, devido à utilização desta codificação, a norma EPON apesar de suportar uma taxa de transmissão de linha de 1.25 Gbps, na realidade é apenas capaz de suportar uma taxa de transmissão de 1 Gbps em ambos os sentidos de transmissão. [2]

Alcance físico

O alcance físico da norma EPON depende das especificações para a camada física. A 1000BASE-PX10 permite um alcance de 10 Km, enquanto a 1000BASE-PX20 permite um alcance máximo de 20 Km. De notar que são utilizados diferentes recetores para cada uma das especificações da camada física. No caso da 1000BASE-PX10 são utilizados recetores PIN, enquanto na 1000BASE-PX20 são utilizados recetores APD. [7]

Split Ratio

Na norma EPON encontra-se definido um *split ratio* de 1:16. No entanto, caso se utilize FEC (*Forward Error Correction*) o *split ratio* da norma EPON pode ser estendido para 1:32. [7]

Gama de comprimentos de onda de trabalho

No sentido *downstream*, a norma EPON define a gama de comprimentos de onda de 1480 a 1500 nm para a transmissão dos dados para os utilizadores. No sentido *upstream* os dados dos utilizadores são enviados utilizando a gama de comprimentos de onda de 1260-1360 nm. Um comprimento de onda adicional, na gama de 1550-1560 nm pode também ser utilizado no sentido downstream, para a distribuição de vídeo RF. [7]

Correção de erros

Na norma EPON a utilização de FEC (Forward Error Correction) é opcional, no entanto as OLTs e ONUs devem suportar a capacidade de codificar e decodificar fluxos de dados. [7] FEC é uma técnica de processamento de sinal que codifica os dados de tal forma que permite que os erros possam ser detetados e corrigidos. Com a utilização de FEC, informação redundante é transmitida juntamente com a informação original. A utilização de FEC resulta num aumento do *link budget* de aproximadamente 3/4 dB, sendo por isso possível suportar maiores taxas de transmissão e distâncias desde a OLT até a ONU, bem como possibilita o aumento do *split ratio* de cada PON. A utilização de FEC permite também diminuir o custo do *transceiver*.

Nesta norma é recomendado o uso do código cíclico Reed-Solomon(255,239). Este código consiste em 239 bytes de dados, aos quais são adicionados 16 bytes de paridade, perfazendo os 255 bytes da palavra codificada, e permite a correção de 8 bytes.

2.3.3 Transmissão EPON

2.3.3.1 Transmissão de tráfego *Downstream* e *Upstream*

A transmissão *downstream* na norma EPON consiste no envio em *broadcast* de pacotes de tamanho variável da OLT para as ONUs. De acordo com a norma, o tamanho da carga paga varia entre 46 a 1500 bytes, possuindo cada pacote um cabeçalho que contém a informação relativa ao destinatário da informação. Apesar de todas as ONUs receberem os mesmos dados, estas diferenciam o tráfego que lhes é destinado através do campo LLID (*Logical Link ID*) embutido nas tramas. Assim, cada ONU recebe apenas os pacotes que lhe são destinados, descartando os restantes. [2]

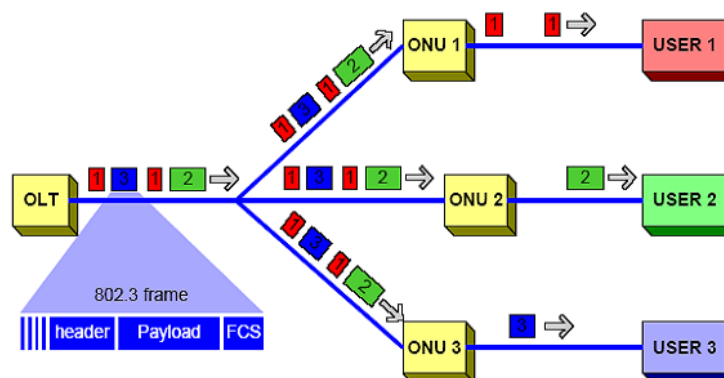


Figura 2.3.1 – Tráfego *Downstream* EPON [8]

Já no sentido *upstream*, de modo a que sejam evitadas colisões de pacotes, é utilizado um protocolo de acesso múltiplo (TDMA, Time Division Multiple Access) para a atribuição de *time slots* a cada utilizador. Desta forma, toda a informação enviada pelas ONUs é multiplexada e enviada para a OLT.

Devido ao facto de as ONUs multiplexarem os dados utilizando o protocolo TDMA, é necessário que haja uma sincronização precisa entre todos os elementos da rede. A sincronização é mantida entre a OLT e ONUs uma vez que a OLT transmite constantemente dados ou sequências pré-definidas com o objetivo de manter o sincronismo. [2]

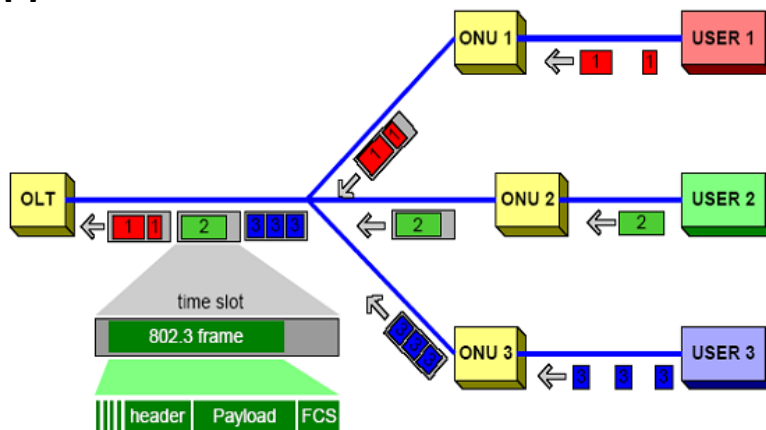


Figura 2.3.2 – Tráfego *Upstream* EPON [8]

2.3.3.2 Ranging

Na norma EPON como já foi referido, todas as ONUs estão sincronizadas com o relógio da OLT através de um mecanismo denominado de *ranging*, que permite medir o RTT (*round-trip time*) entre a OLT e uma ONU através do uso de mensagens de controlo normais como GATE e REPORT. Na Figura 2.3.3 encontra-se ilustrado o processo de cálculo do RTT. A OLT envia uma mensagem GATE normal com o selo do tempo T_0 . Após algum tempo (T_{wait}), a ONU deve responder com uma mensagem REPORT. O tempo selado na mensagem REPORT (T_1) representa exatamente $T_0 + T_{\text{wait}}$ uma vez que a ONU tem o tempo preciso da OLT. Por fim, a OLT ao receber a mensagem pode usar a informação $T_2 - T_1$ para calcular o RTT. [2]

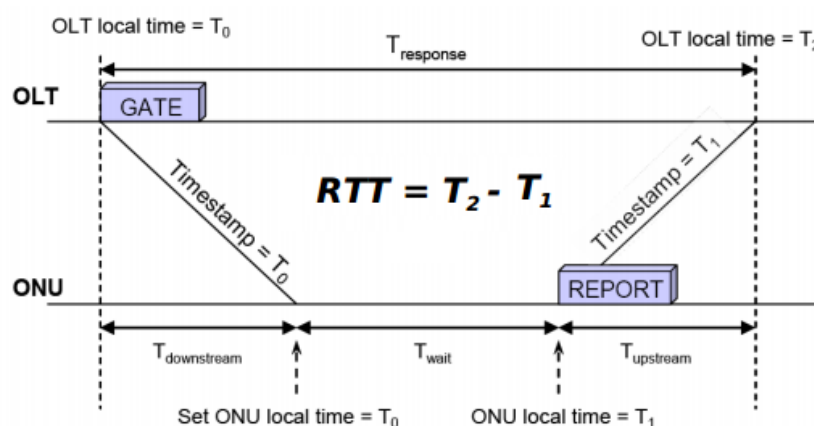


Figura 2.3.3 – Processo *Ranging* [8]

2.3.3.3 Processo descoberta automática (*Auto Discovery*)

Este processo permite que as ONUs se registem e entrem/reentrem no sistema. O facto de ser automático deve-se ao facto de a OLT difundir periodicamente uma janela de descoberta, que permite a todas as ONUs que não estão inicializadas responder e negociar autonomamente parâmetros como RTT, tempos de *on-off* do laser e o LLID das ONUs. O processo é realizado através de mensagens GATE especiais, chamadas mensagens Discovery Gate, que são enviadas periodicamente em *broadcast* através da rede e que contêm as capacidades que o OLT oferece. [2]

O processo encontra-se ilustrado na Figura 2.3.4.

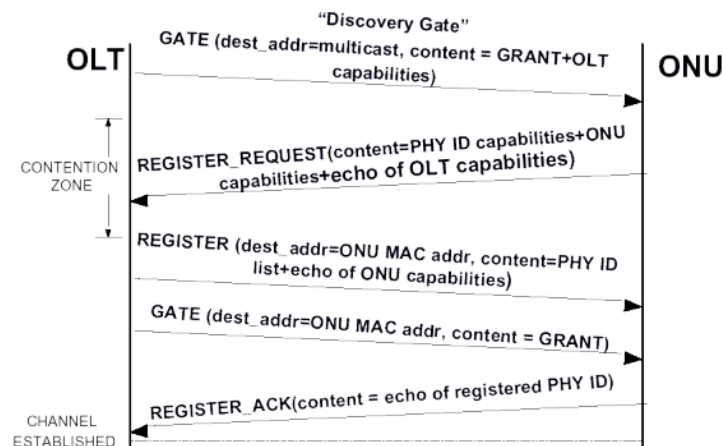


Figura 2.3.4 – Processo *Auto Discovery* [8]

Uma ONU que foi recentemente introduzida, recebe a mensagem *Discovery Gate* e responde com uma mensagem REGISTER_REQ contendo as suas próprias capacidades e um eco da mensagem enviada pela OLT. A OLT responde com uma mensagem REGISTER destinada para a nova ONU, atribuindo-lhe um LLID, e também responde com uma mensagem GATE, dando acesso à ONU a uma nova janela para transmissão. Por fim, o processo de descoberta automática é completo e o canal de comunicação estabelecido, com o envio de uma última mensagem do tipo REGISTER_ACK da ONU para a OLT, contendo um eco do LLID gravado.

2.4 Gigabit-capable Passive Optical Network (G-PON)

2.4.1 Arquitetura

Sendo uma rede de acesso do tipo PON, a arquitetura típica G-PON (Figura 2.4.1) segue os seus moldes. Como tal, numa rede G-PON os únicos equipamentos ativos são a OLT e as ONUs. Desde o CO, uma fibra ótica monomodo liga-se a um splitter ótico 1:N, e as portas de saída deste ligam aos assinantes através de fibras monomodo individuais. Além disso, utiliza WDM para a multiplexagem de várias portadoras óticas numa única fibra ótica através da utilização de diferentes comprimentos de onda, permitindo um fluxo de dados bidirecional através de uma fibra ótica.

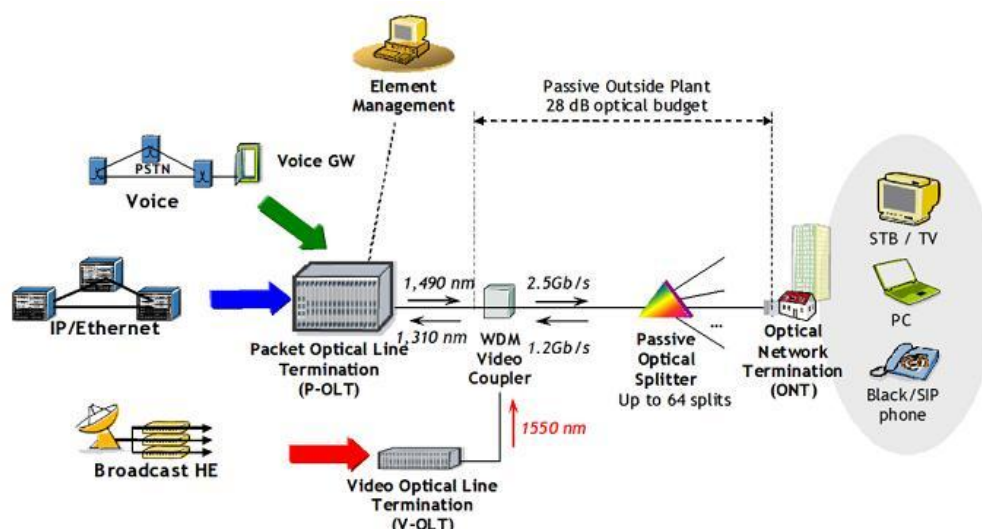


Figura 2.4.1 – Diagrama esquemático de uma rede G-PON [9]

Apesar da arquitetura típica de uma rede G-PON ser de fibra até casa do cliente (FTTH), esta pode variar consoante a localização da ONU. Na Figura 2.4.2 podem-se observar as diferentes arquiteturas que variam desde FTTH, fibra até um conjunto de subscritores ou edifício subscritor (FTTB) ou fibra até a um equipamento instalado num ponto de acesso próximo do cliente final (FTTCab). As diferenças presentes em cada arquitetura são devidas principalmente aos serviços suportados por cada uma delas, os quais podem ser observados na Tabela 2.4.1.

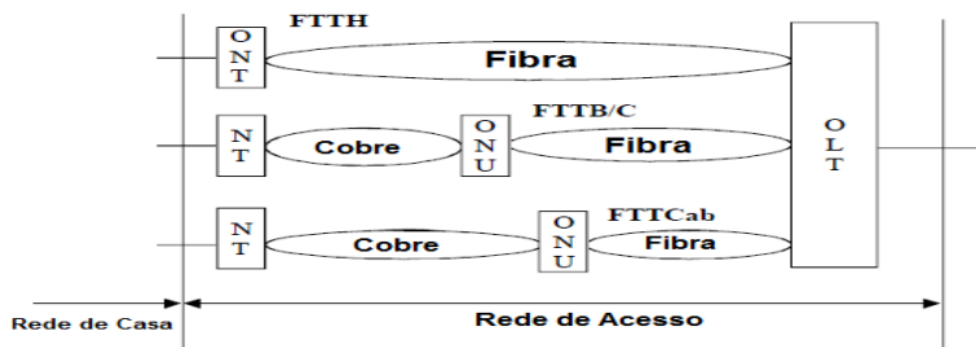


Figura 2.4.2 – Diferentes arquiteturas de uma rede G-PON [10]

	FTTB Empresas	FTTB para <i>Multi-Dwelling Units</i>	FTTC	FTTCab	FTTH	Exemplos de serviços fornecidos
Serviços de banda larga assimétricos	✗	✓	✓	✓	✓	Serviços de radiodifusão digital, Video on Demand (VoD), Download de arquivos, Jogos on-line.
Serviços de banda larga simétricos	✓	✓	✓	✓	✓	Transmissão de conteúdo, e-mail para troca de arquivos, ensino à distância, telemedicina.
POTS e ISDN	✓	✓	✓	✓	✓	Deve ser capaz de fornecer, de forma flexível, serviços de banda estreita por telefone com o momento oportuno para a introdução.
Serviços Linha Privada	✓	✗	✗	✗	✗	Deve ser capaz de fornecer, de forma flexível, serviços de linhas privadas a taxas diversas.
xDSL <i>backhaul</i>	✗	✗	✓	✓	✗	

Tabela 2.4.1 – Serviços fornecidos pelas diferentes arquiteturas G-PON [10]

2.4.2 Características Técnicas

Bit Rate

A norma G-PON define uma série de diferentes taxas de transmissão, que se encontram resumidas na Tabela 2.4.2:

Sentido da transmissão	Bit rate (Mbps)
Downstream	1244.16, 2488.32
Upstream	155.52, 622.08, 1244.16, 2488.32

Tabela 2.4.2 – Taxas de transmissão G-PON [11]

Através dos valores apresentados na Tabela 2.4.2 é possível obter todas as combinações possíveis das taxas de transmissão para ambos os sentidos. De notar, que destas combinações, apenas a correspondente a uma taxa de transmissão de *downstream* de 1244.16 Mbps e 2488.32 Mbps no sentido *upstream* não é possível. Das combinações possíveis, o padrão mais utilizado é o de 2488.32 Mbps no sentido *downstream* e 1244.16 Mbps no sentido *upstream*. [11]

Código de Linha

O código de linha utilizado em ambos os sentidos de transmissão, na norma G-PON, é o código NRZ (*Non Return to Zero*). [10]

Alcance físico

O alcance físico é a distância física máxima entre a OLT e uma ONU. Na norma G-PON, encontram-se definidas duas opções para o alcance físico: 10 Km e 20 Km. Para o caso em que se utilize um díodo laser do tipo *Fabry-Perot* na ONU, com uma taxa de transmissão igual ou superior a 1.25 Gbps, assume-se que a distância máxima é de 10 Km. [10]

Split Ratio

Os operadores das redes pretendem ter o máximo de subscritores a utilizar as suas redes de acesso, de modo a rentabiliza-las ao máximo. Desta forma, quanto maior o *split ratio*, maior o interesse dos operadores nas redes em questão.

Na norma G-PON encontra-se definido um *split ratio* de 1:64. No entanto, atendendo à tecnologia atual, *split ratios* superiores são possíveis para a camada física da mesma, podendo o *split ratio* da norma G-PON ser estendido até 1:128. Contudo, este *split ratio* superior implica que o operador de rede possua um orçamento de potência ótica superior, de modo a suportar o alcance físico da rede. [10]

Gama de comprimentos de onda de trabalho

A norma G-PON define dois planos de comprimentos de onda de funcionamento, que variam consoante o sistema seja de uma ou de duas fibras óticas.

Para o caso em que o sistema utiliza apenas uma fibra ótica é utilizada a gama de comprimentos de onda de 1480 a 1500 nm para o sentido *downstream* e a gama de 1260 a 1360 para a transmissão de dados no sentido *upstream*.

Caso o sistema utilize duas fibras óticas, uma para cada sentido de transmissão, é utilizada a gama de comprimentos de onda de 1260 a 1360nm para a transmissão de dados em ambos os sentidos. [11] [12]

Um comprimento de onda adicional, na gama de 1550-1560 nm pode também ser utilizado no sentido downstream, para a distribuição de vídeo RF. [11] [12]

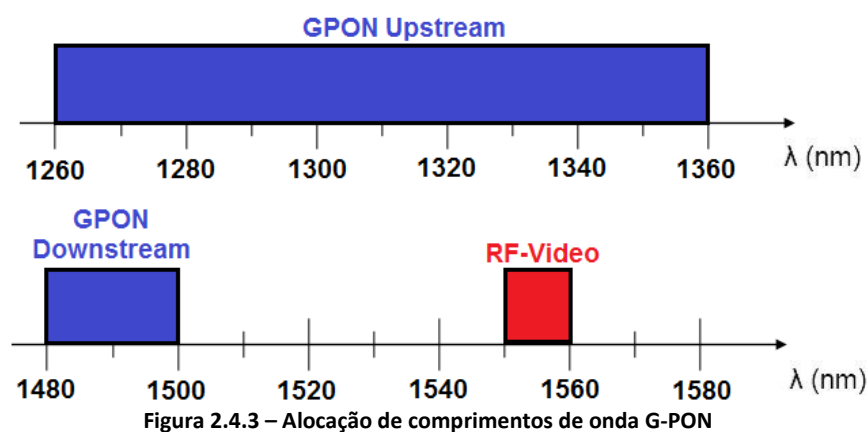


Figura 2.4.3 – Alocação de comprimentos de onda G-PON

Correção de erros

Na norma G-PON a utilização de FEC é opcional, no entanto as OLTs e ONUs devem suportar a capacidade de codificar e decodificar os fluxos de dados codificados. Nesta norma é recomendado o uso do código cíclico Reed-Solomon(255,239). [12] [13]

2.4.3 Transmissão G-PON

2.4.3.1 Transmissão de tráfego *Downstream* e *Upstream*

A transmissão *downstream* da norma G-PON consiste no envio em *broadcast* de tramas fixas de $125\ \mu s$ da OLT para as ONUs. Apesar de todas as ONUs receberem os mesmos dados, estas diferenciam o tráfego que lhes é destinado através do campo GEM port ID embutido nas tramas, procedendo depois a filtragem dos dados que lhes são destinados. [12] [14]

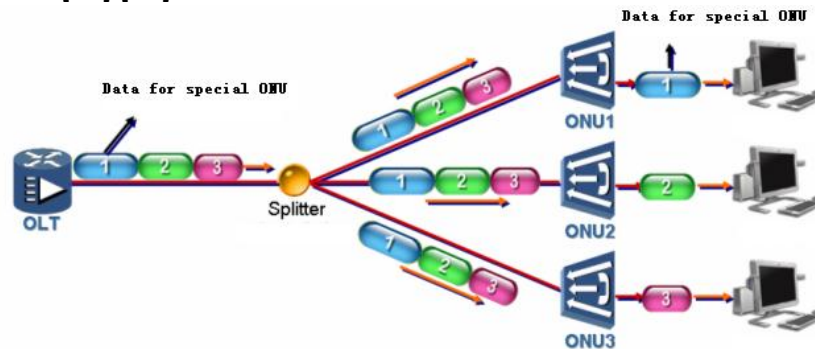


Figura 2.4.4 – Transmissão do tráfego em *downstream* [15]

Já no sentido *upstream*, de modo a que sejam evitadas colisões de pacotes, é utilizado um protocolo de acesso múltiplo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) para a atribuição de janelas de tempo a cada ONU. As janelas de tempo são atribuídas a cada ONU de acordo com o conteúdo do campo *Upstream Bandwidth Map* enviado nas tramas de *downstream*. Assim, todas as ONUs podem enviar os seus próprios dados sem a ocorrência de colisões de pacotes. [12] [14]

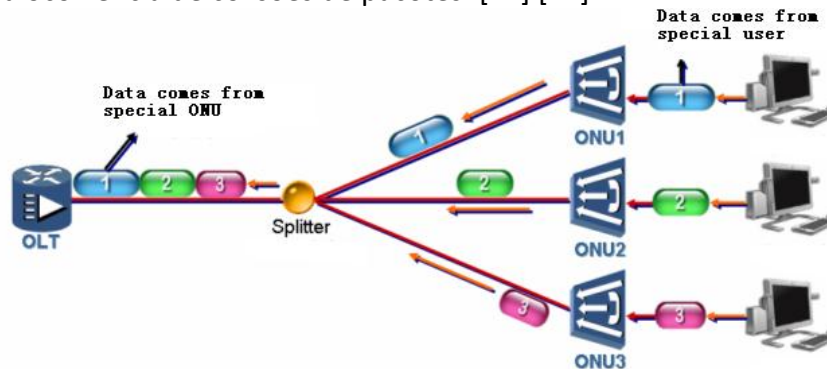


Figura 2.4.5 – Transmissão do tráfego em *upstream* [15]

2.4.3.2 Ranging

Devido ao facto de as ONUs multiplexarem os dados utilizando o protocolo TDMA, é necessário que haja uma sincronização precisa entre todos os elementos da rede. Para alcançar a sincronização, a OLT começa por usar o mecanismo de *ranging* que determina a distância de cada ONU à OLT. Após a ONU determinar a distância e o tempo de atraso entre esta e a OLT, a OLT verifica se as janelas de tempo atribuídas a cada ONU não irão provocar colisões. Além de medir a distância lógica entre a ONU e a OLT, o processo de *ranging* é também utilizado na conexão com uma nova ONU ou para o restabelecimento da ligação com alguma ONU que tenha perdido a sincronização. Após este processo, a OLT atribui um GEM Port ID a ONU que estabelece a ligação. [2]

2.4.3.3 Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA)

A atribuição dinâmica da largura de banda (DBA, *Dynamic Bandwidth Allocation*) é um processo pelo qual a OLT realoca as possibilidades de transmissão de *upstream* das diversas ONUs. Estas possibilidades de transmissão variam consoante a indicação dinâmica do seu estado de atividade e consoante o contrato de tráfego configurado para cada ONU. [12]

Este processo é feito da seguinte forma: nas tramas de *upstream*, é utilizado um campo (DBRu) que permite reportar o estado do tráfego do transmissor T-CONT, que representa o grupo de conexões lógicas que são utilizadas para a gestão da atribuição da largura de banda no sentido *upstream*. Este campo é utilizado para sinalizar um pedido ao controlador MAC para uma atribuição de transmissão *upstream*. Baseado nesta informação, a OLT define as possibilidades de transmissão para as diversas ONUs através do campo US BW map - campo que corresponde ao mapa de alocação de largura de banda *upstream* - da trama de *downstream*. Este campo contém um número variável de estruturas de acesso que definem quais as ONUs e o tempo em que lhes é permitido transmitir. [2]

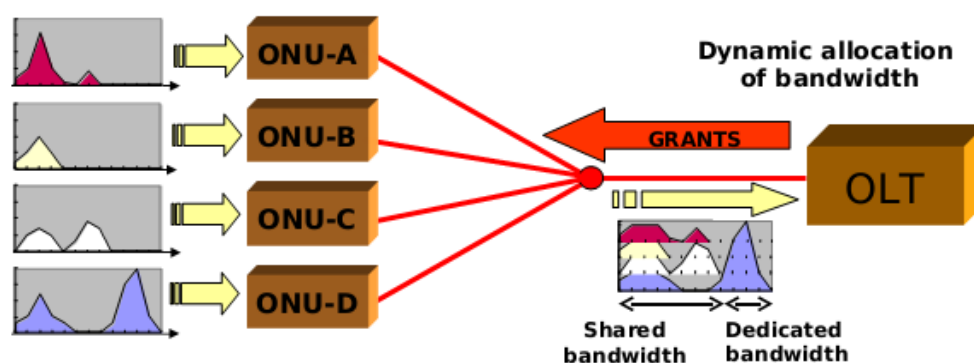


Figura 2.4.6 – Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA) [8]

Em comparação com a atribuição de largura de banda estática, o mecanismo de DBA melhora a utilização da norma G-PON no sentido *upstream* uma vez que reage adaptativamente para os padrões de tráfego de rajadas das ONUs. O uso de DBA além de permitir que os operadores de rede possam adicionar mais subscritores a uma PON, devido à utilização mais eficiente da largura de banda disponível, permite também que os subscritores possam desfrutar de serviços avançados, como os que exigem taxas variáveis, com picos que ultrapassam os níveis que podem ser razoavelmente atribuídos de forma estática. [12]

2.4.3.4 Método de encapsulamento de dados G-PON

A norma G-PON utiliza um método de encapsulamento para o transporte de dados, na camada de convergência de transmissão G-PON especificada, denominado GEM, que permite à norma G-PON suportar tramas de tamanho variável. Além disso, providencia multiplexagem de portas GEM e fragmentação e reagrupamento de carga paga. Assim, este método de encapsulamento permite que as redes G-PON acomodem todos os tipos de serviço, tais como ATM, TDM e Ethernet. [2]

2.4.4 Questões de convivência G-PON

Apesar de a gama de comprimentos de onda se encontrar especificada na norma ITU-T G.984.2, na recomendação G.984.5 esta gama de comprimento de onda reservada encontra-se redefinida. Além disso, nessa mesma recomendação, encontra-se especificada a tolerância à interferência de sinais das ONUs G-PON de modo a que seja possível a coexistência de G-PON com serviços adicionais, tais como serviços de próxima geração (NGA – *Next Generation Access*) e vídeo.

Para a transmissão de *downstream* e vídeo RF são utilizados os mesmos comprimentos de onda que foram especificados na secção 2.4.2. No entanto, para o sentido *upstream* encontram-se definidas três opções: estreita, reduzida e regular, cujas gamas de comprimentos de onda se encontram apresentadas na Tabela 2.4.3. Através da análise das várias opções é possível concluir que dependendo da opção escolhida para a transmissão do sinal *upstream* G-PON, este pode ocupar de 20 a 100nm da banda O.

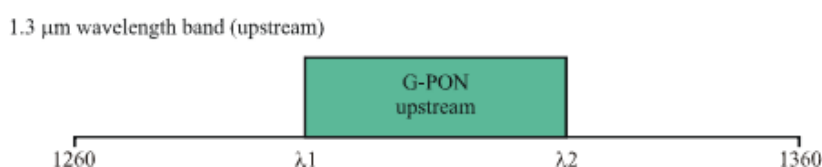


Figura 2.4.7 – Banda de comprimento de onda de *upstream* G-PON [16]

Limite	Notação	Unidade	Valor nominal	Exemplo aplicação
Banda de comprimento de onda de 1.3 μm				G-PON <i>upstream</i>
- Opção de banda de comprimento de onda estreita				p.e. ONUs baseadas em lasers Fabry-Perot
Inferior	λ1	nm	1300	
Superior	λ2	nm	1320	
- Opção de banda de comprimento de onda reduzida				p.e. ONUs baseadas em lasers DFB
Inferior	λ1	nm	1290	
Superior	λ2	nm	1330	
- Opção de banda de comprimento de onda regular				p.e. ONUs baseadas em lasers de comprimento de onda selecionável
Inferior	λ1	nm	1260	
Superior	λ2	nm	1360	

Tabela 2.4.3 – Opções para a gama de comprimentos de onda de *upstream* G-PON [16]

Além disso, encontram-se definidas três opções para serviços de próxima geração, duas das quais situadas na banda E+ e a outra situada na banda C e L. As gamas de comprimentos de onda definidas para os serviços de próxima geração encontram-se apresentadas na Tabela 2.4.4.

Na Figura 2.4.8 pode-se verificar a existência de uma banda de guarda que separa a banda de *upstream* G-PON das bandas reservadas para serviços de próxima geração. A interferência entre os sinais dessas duas bandas provoca degradação em ambos os sinais. Assim, de modo a se obter o isolamento necessário, deve-se utilizar filtros (WBF – *Wavelength Blocking Filters*) de modo que a degradação entre os sinais seja negligenciável.

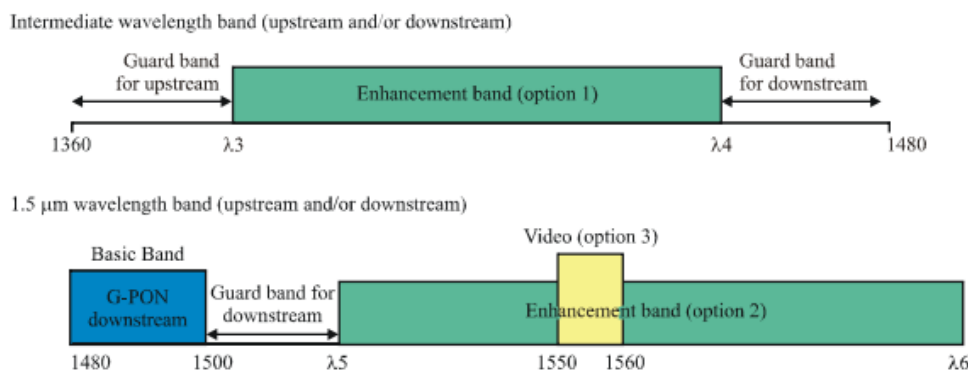


Figura 2.4.8 – Bandas de comprimento de onda de G-PON *downstream*, vídeo e NGA [16]

Bandas para Serviços de próxima geração (NGA)				
Limite	Notação	Unidade	Valor nominal	Notas
- Opção 1-1				Aplicável apenas para fibras com baixo <i>water peak</i>
Inferior	λ_3	nm	1415	
Superior	λ_4	nm	1450	
- Opção 1-2				Aplicável apenas para fibras com baixo <i>water peak</i>
Inferior	λ_3	nm	1400	
Superior	λ_4	nm	1450	
- Opção 2				Limite superior é determinado por escolha do operador
Inferior	λ_5	nm	1530	
Superior	λ_6	nm	1580 a 1625	

Tabela 2.4.4 - Opções de gamas de comprimentos de onda para NGA [16]

A sensibilidade mínima das ONUs deve ser atingida mesmo na presença de sinais NGA e/ou sinais de vídeo. Assim, as ONUs G-PON necessitam de isolar a interferência entre canais através da utilização de WBF apropriados e de filtros WDM por forma a limitar o efeito dos sinais de interferência. A recomendação G.984.5 especifica a tolerância X/S (X – potência sinal máxima de sinal interferência, S – potência recebida do sinal banda base) de modo que o limite da sensibilidade do recetor G-PON não seja ultrapassado.

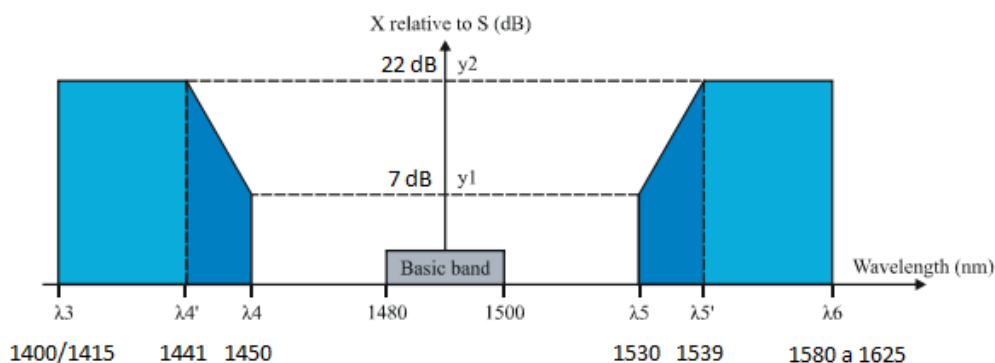


Figura 2.4.9 – Tolerância X/S de modo que o limite da sensibilidade do recetor G-PON não seja ultrapassado [16]

Os comprimentos de onda e a potência ótica dos serviços de NGA e vídeo devem ter como referência os valores apresentados na Figura 2.4.9 no caso de coexistência com G-PON.[16] Pode-se então concluir que não se pode utilizar os 30 nm em relação ao limite superior e inferior da banda de *downstream* G-PON. Além disso,

devem ser respeitados mais 9 nm de cada um dos lados devido à banda de transição dos filtros.

Para o caso de um cenário de coexistência entre G-PON, serviços NGA e vídeo é assumido que são necessárias bandas de guarda em ambos os lados da banda de transmissão de vídeo de modo a serem evitadas interferências que possam causar a degradação do CNR no recetor vídeo. [16] Tomando em conta as bandas de guarda tanto do sinal de *downstream* G-PON como do vídeo, pode-se concluir que os comprimentos de onda entre estes dois não devem ser utilizados para serviços de próxima geração. Por esse motivo, deve-se utilizar o plano de comprimentos de onda apresentado na Figura 2.4.10.

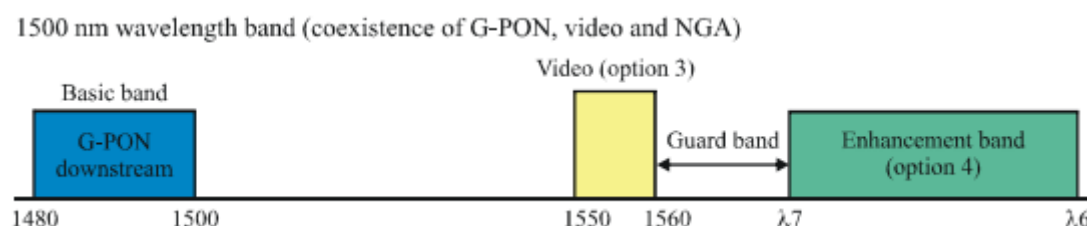


Figura 2.4.10 – Gamas de comprimentos de onda de funcionamento para o caso coexistência de G-PON, NGA e vídeo [16]

A gama da banda de guarda depende das características do filtro de vídeo *overlay* e da performance do recetor vídeo. No entanto, tomando como referência o exemplo do filtro de isolamento apresentado na recomendação G.987.5 (Figura 2.4.11), é possível concluir que não se pode utilizar os 14/15 nm em relação aos limites superior e inferior da banda de comprimentos de onda definida para a transmissão de vídeo.

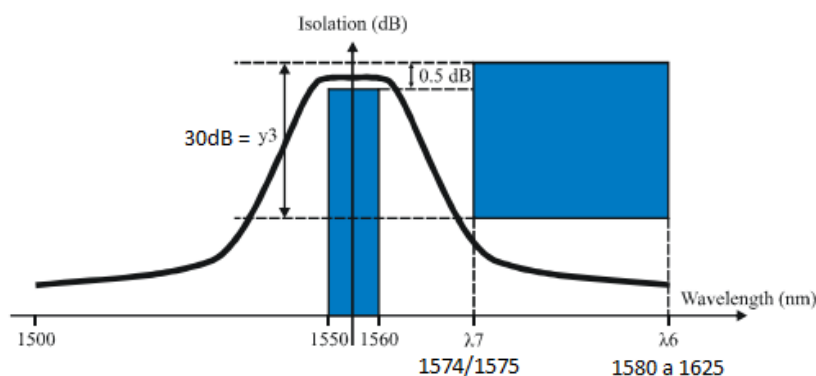


Figura 2.4.11 – Exemplo de características de isolamento de filtro de vídeo [16]

Todos estes critérios permitem que os componentes destas redes (lasers, filtros, recetores) tenham parâmetros mais relaxados, o que permite uma diminuição do custo total destas redes.

Desta forma é possível analisar a ocupação do espectro para os vários cenários de convivência G-PON, cujos cenários se encontram apresentados na Figura 2.4.12.

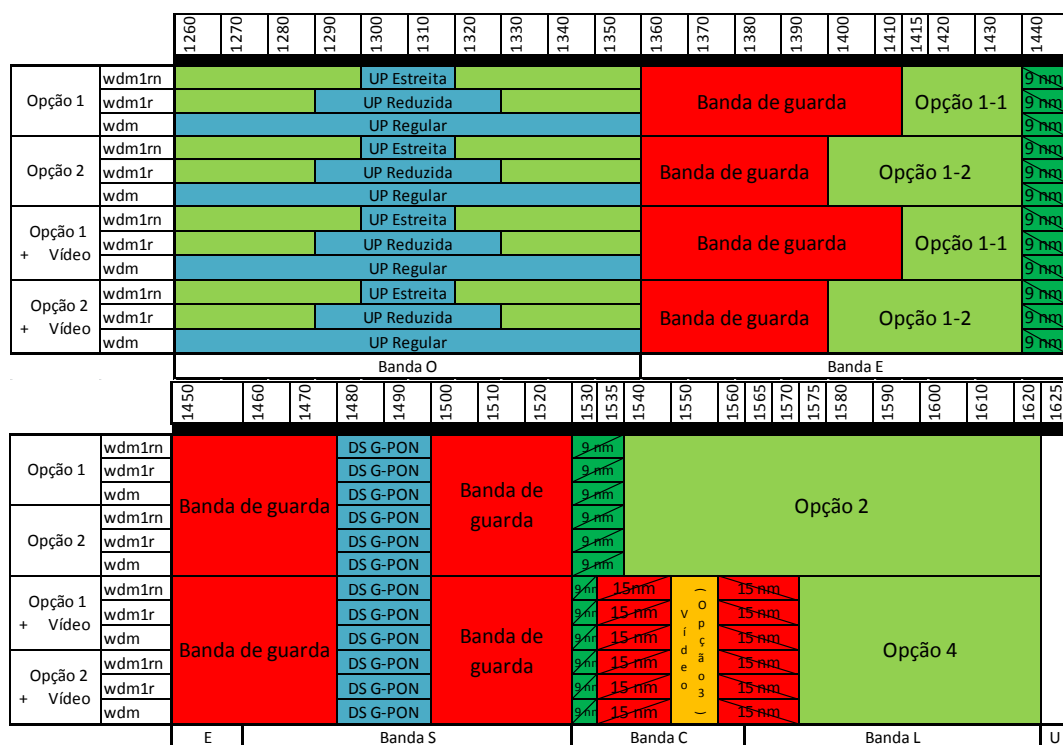


Figura 2.4.12 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência G-PON com serviços adicionais

Através da análise da Figura 2.4.12 é possível verificar que o espectro ocupado pela tecnologia G-PON, deixa disponíveis as bandas E, C e L para serviços de próxima geração e vídeo. No entanto, no caso de coexistência entre G-PON e vídeo, encontram-se disponíveis apenas as bandas E e L e a zona de 1530 a 1535nm da banda C.

2.5 Next-Generation Passive Optical Networks (NG-PON)

2.5.1 Introdução

O rápido crescimento da Internet e a intensa competitividade entre operadores de telecomunicações, tem levado a uma elevada atividade de investigação de modo a encontrar soluções que permitam a implantação de redes de acesso mais baratas, que providenciem maiores taxas de transmissão e se possível que convivam com as tecnologias já existentes. Além disso, o número de utilizadores de redes FTTH está continuamente a aumentar. A título de exemplo, em 2011, estas redes possuíam 80 milhões de utilizadores, tendo tido um aumento de 18 milhões nesse mesmo ano [17]. Esta implantação massiva das redes PON, aumento do número de utilizadores e incessante necessidade de largura de banda por parte dos mesmos fez com que os operadores esperassem mais das redes PON. Desta forma a necessidade de uma nova arquitetura de acesso, com maior capacidade, maior alcance e menor custo tornou-se evidente.

Embora a norma G-PON forneça capacidade suficiente para as necessidades atuais, dadas as necessidades crescentes, acredita-se que NG-PON será o desenvolvimento natural da norma G-PON uma vez que preenche todos os requisitos anteriormente especificados e é compatível com a norma G-PON, o que possibilita aos operadores de telecomunicações efetuar uma migração gradual para os sistemas PON de próxima geração.

2.5.2 NG-PON Roadmap

A evolução da tecnologia NG-PON encontra-se dividida em duas fases: NG-PON1 e NG-PON2. Para que seja mais perceptível o caminho de evolução desta tecnologia, é de seguida apresentado o *Roadmap* da tecnologia NG-PON (Figura 2.5.1).

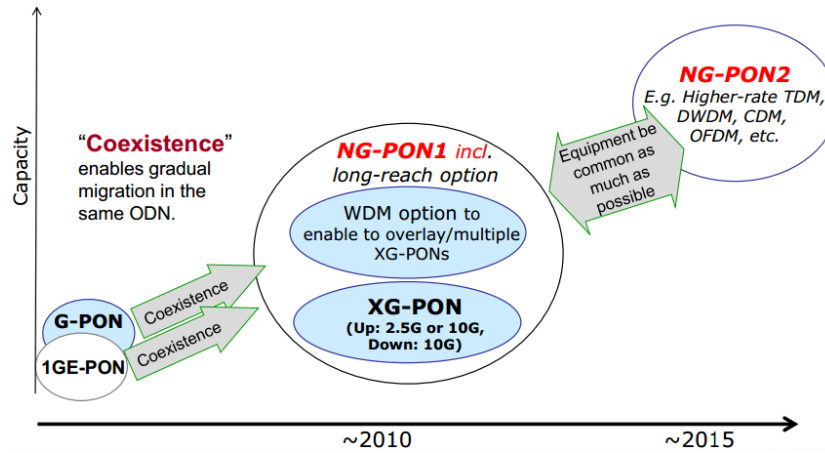


Figura 2.5.1 – NG-PON Roadmap [18]

A primeira fase, NG-PON1, é uma solução a médio prazo que requer a coexistência da tecnologia XG-PON com G-PON no mesmo ODN, permitindo a utilização das infraestruturas já existentes. Além disso, permite uma migração lenta, favorecendo aos operadores de telecomunicações um maior controlo dos custos associados, uma vez que os utilizadores G-PON não necessitam de migrar instantaneamente para XG-PON, podendo servir novos clientes e ir atualizando ao longo do tempo os clientes G-PON.

Por sua vez, a segunda fase, NG-PON2, é uma solução a longo prazo e não requer a coexistência com G-PON no mesmo ODN. Desta forma, será necessário um elevado investimento por parte dos operadores de telecomunicações, uma vez que é necessário implantar um novo ODN, independente do atualmente utilizado para os clientes G-PON. Além disso, ao contrário da fase NG-PON1 que tem objetivos claros, esta segunda fase é ainda alvo de elevada atividade de investigação, sendo bastantes as tecnologias candidatas a ser adotadas para NG-PON2.

2.6 10-Gigabit-capable Passive Optical Network (XG-PON)

2.6.1 Arquitetura

Sendo uma rede de acesso do tipo PON, a arquitetura típica XG-PON segue os seus moldes. Como tal, numa rede XG-PON os únicos equipamentos ativos são a OLT e as ONUs. Desde o CO, uma fibra ótica monomodo liga-se a um splitter ótico 1:N, e as portas de saída deste ligam aos assinantes através de fibras monomodo individuais. Além disso, utiliza WDM para a multiplexagem de várias portadoras óticas numa única fibra ótica através da utilização de diferentes comprimentos de onda, permitindo um fluxo de dados bidirecional através de uma fibra ótica.

Tal como acontece nas redes G-PON, apesar da arquitetura típica de uma rede XG-PON ser de fibra até casa do cliente (FTTH), esta pode variar consoante a localização da ONU. Nas figuras 2.6.1 e 2.6.2 podem-se observar as diferentes arquiteturas que variam desde FTTH, fibra até um conjunto de subscritores ou edifício subscritor (FTTB), fibra até um escritório (FTTO), *Fiber to the Cell* (FTTC), ou fibra até a um equipamento instalado num ponto de acesso próximo do cliente final (FTTCab). As diferenças presentes em cada arquitetura são devidas principalmente aos serviços suportados por cada uma delas, os quais podem ser observados na Tabela 2.6.1.

	FTTB Empresas	FTTB para <i>Multi-Dwelling Units</i>	FTTC e FTTCab	FTTO	FTTCell wireless	FTTH
Serviços de banda larga assimétricos	✗	✓	✓	✗	✗	✓
Serviços de banda larga simétricos	✓	✓	✓	✓	✗	✓
POTS	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Linha Privada	✓	✗	✗	✓	✗	✗
xDSL <i>backhaul</i>	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Serviços de banda larga simétricos/ assimétricos baseados em pacotes	✗	✗	✗	✗	✓	✗
Serviços TDM simétricos	✗	✗	✗	✗	✓	✗
<i>Hot Spots</i>	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabela 2.6.1 - Serviços fornecidos pelas diferentes arquiteturas XG-PON [19]

Através da análise da Tabela 2.6.1 é possível verificar a introdução dos cenários FTTCell e FTTO, quando em comparação com a norma G-PON.

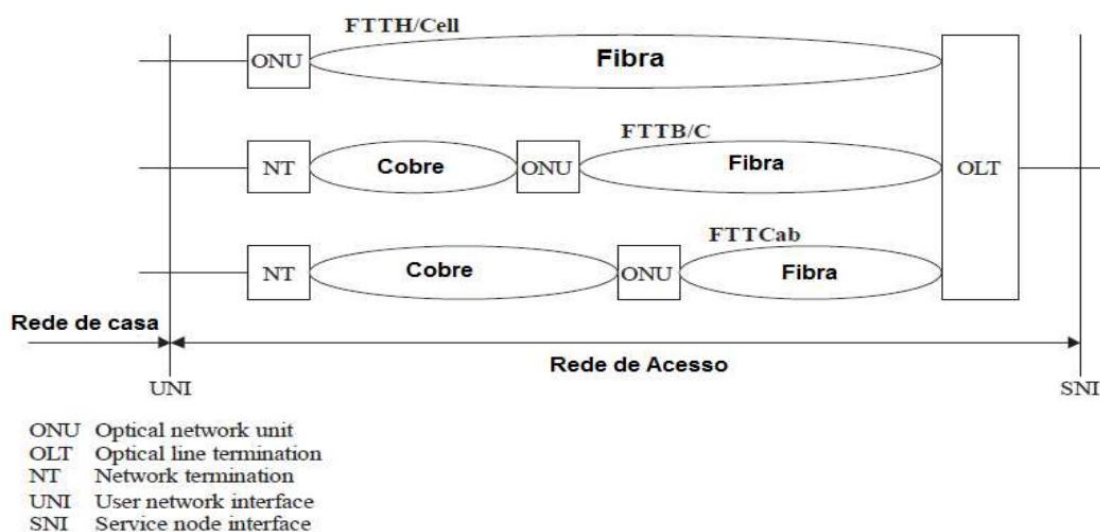


Figura 2.6.1 – Diferentes arquiteturas de uma rede XG-PON [19]

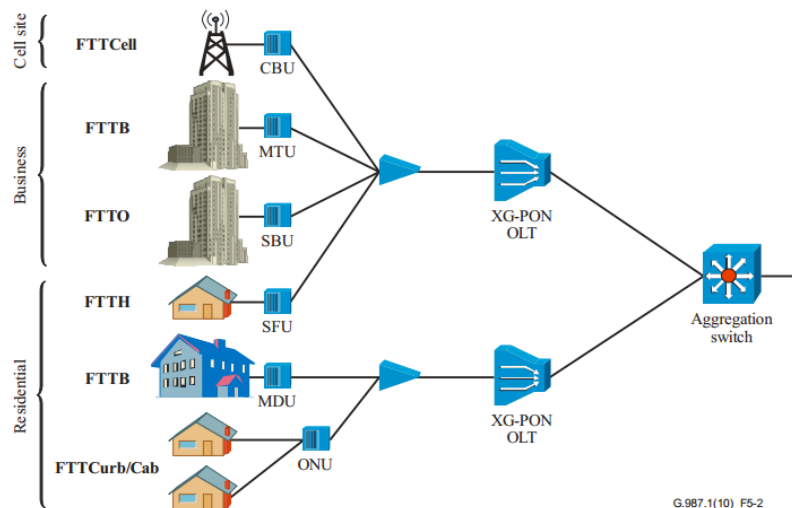


Figura 2.6.2 – Arquiteturas suportadas por uma rede XG-PON [19]

2.6.2 Características Técnicas

Bit Rate

Na norma XG-PON encontram-se definidos dois conjuntos de velocidades de transmissão, variando o nome associado consoante a taxa de transmissão do sentido *upstream*: [19]

- **XG-PON1:** Taxa de transmissão de 9.95328 Gbps no sentido downstream e 2.48832 Gbps no sentido *upstream*.
- **XG-PON2:** Taxa de transmissão de 9.95328 Gbps tanto no sentido downstream, como no *upstream*.

Em virtude dos desafios tecnológicos que precisam de ser superados de modo a que seja possível construir blocos baratos e capazes de transmitir rajadas de *upstream* de 10 Gbps, neste momento, a recomendação XG-PON (G.987) apenas se foca em XG-PON1.

Código de Linha

O código de linha utilizado em ambos os sentidos de transmissão, na norma XG-PON, é o código NRZ (*Non Return to Zero*). [20]

Alcance

A norma XG-PON deve suportar um alcance de pelo menos 20 Km. Além disso, a camada de convergência de transmissão da norma XG-PON necessita de suportar uma distância de fibra de 60 Km. Essa mesma camada tem também que ser capaz de suportar uma distância de fibra diferencial até 40 Km e de configurar a distância diferencial máxima da fibra com um *step* de 20 Km. [19]

Split Ratio

Uma vez que a maioria dos operadores de rede construiu o ODN das suas infraestruturas G-PON com *split ratios* de 1:32 e 1:64, o *split ratio* de 1:64 é o requisito mínimo para a norma XG-PON de modo a permitir coexistência com as infraestruturas anteriores.

Os operadores de telecomunicações pretendem rentabilizar ao máximo as suas redes PON. Desta forma, muitos operadores de redes estão interessados em aumentar o *split ratio* das suas redes atuais G-PON, para por exemplo 1:128 ou 1:256, de modo a melhorar a economia global de XG-PON. Na Figura 2.6.3 encontra-se apresentada uma implementação genérica G-PON. Neste modelo, uma arquitetura de divisão única é um caso especial, onde $m=64$ e $n=1$, não sendo necessária divisão no nó de acesso. Observando a Figura 2.6.4, onde são apresentadas as opções da arquitetura de divisão de XG-PON, é possível verificar que o aumento do *split ratio* pode ser realizado na secção *backhaul* e/ou através da extensão das redes PON nos utilizadores finais.

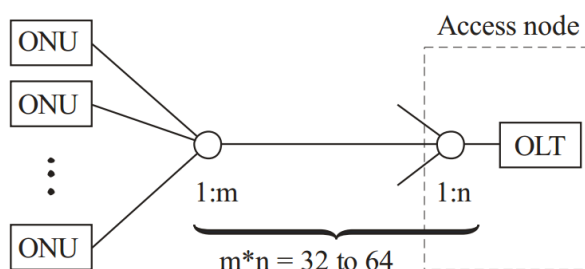


Figura 2.6.3 – Implementação genérica G-PON [19]

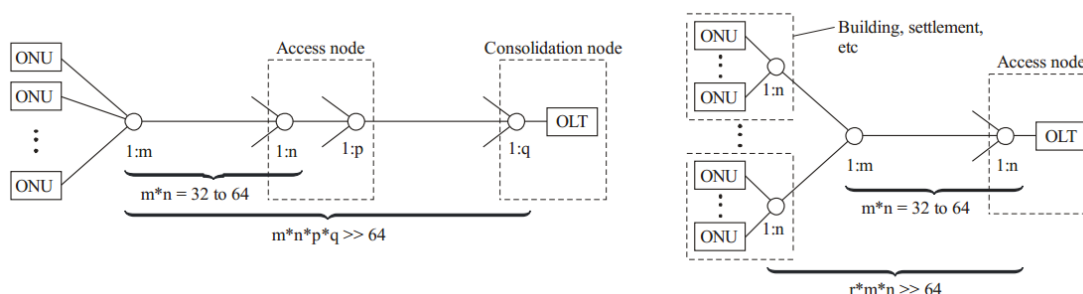


Figura 2.6.4 – Opções da arquitetura de divisão XG-PON [19]

Gama de comprimentos de onda de trabalho

No sentido *downstream*, a norma XG-PON define a gama de comprimentos de onda de 1575 a 1580 nm. Para o sentido *upstream*, é utilizada a gama de comprimentos de onda de 1260 a 1280 nm. Desta forma, é permitida a coexistência de XG-PON com G-PON e com os serviços de vídeo, uma vez que é utilizada uma banda de guarda que evita a interferência entre estes sinais. [19]

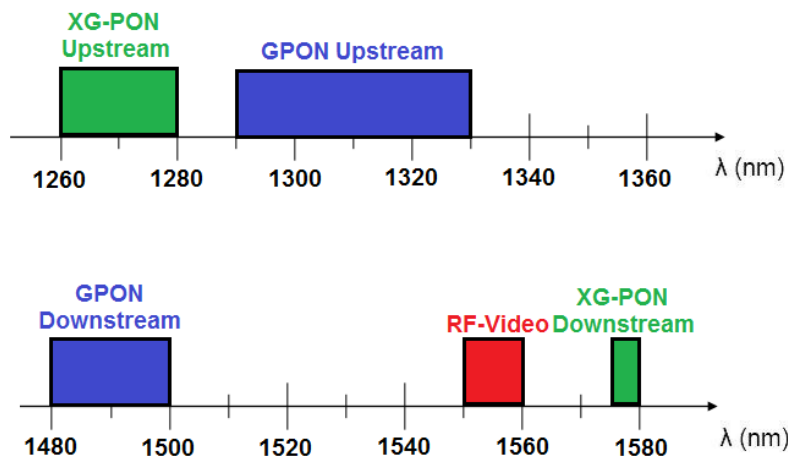


Figura 2.6.5 – Alocação de comprimentos de onda XG-PON no caso de coexistência entre XG-PON, G-PON e Vídeo

Correção de erros

Na norma XG-PON a utilização de FEC (Forward Error Correction) é obrigatória em ambos os sentidos de transmissão.

No sentido *downstream* é obrigatória a utilização do código cíclico Reed-Solomon(255,223). Este código consiste em 223 bytes de dados, aos quais são adicionados 32 bytes de paridade, perfazendo os 255 bytes da palavra codificada, e permite a correção de 16 bytes. Por sua vez, no sentido *upstream* é obrigatória a utilização do código cíclico RS(248,232), consistindo em 232 bytes de dados, aos quais são adicionados 16 bytes de paridade, perfazendo os 248 bytes da palavra codificada, e permite a correção de 8 bytes. [21]

2.6.3 Requisitos do Sistema XG-PON

2.6.3.1 Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA)

Tal como na norma G-PON, na transmissão *upstream* da norma XG-PON é feita uma atribuição dinâmica da largura de banda (DBA, Dynamic Bandwidth Allocation).

Em comparação com a atribuição de largura de banda estática, o mecanismo de DBA melhora a utilização da norma XG-PON no sentido *upstream* uma vez que reage adaptativamente para os padrões de tráfego de rajadas das ONUs. O uso de DBA além de permitir que os operadores de rede possam adicionar mais subscritores a uma PON, devido ao uso mais eficiente da largura de banda, permite também que os subscritores possam desfrutar de serviços avançados, como os que exigem taxas variáveis, com picos que ultrapassam os níveis que podem ser razoavelmente atribuídos de forma estática. [21]

2.6.4 Cenários de migração

A primeira fase da tecnologia NG-PON é uma solução a médio prazo que requer a coexistência da tecnologia XG-PON com G-PON no mesmo ODN, permitindo a utilização das infraestruturas já existentes, o que permite rentabilizar todo o tempo e dinheiro investido na implementação das redes G-PON. Além disso, permite uma

migração lenta, permitindo aos operadores de telecomunicações ter um maior controlo dos custos associados, uma vez que os utilizadores G-PON não necessitam de migrar instantaneamente para XG-PON, podendo servir novos clientes e ir atualizando ao longo do tempo os clientes G-PON. Por forma a corresponder às necessidades dos operadores, encontram-se definidos na recomendação relativa aos requisitos gerais XG-PON (G.987.1) dois cenários de migração possíveis:

- Cenário de migração PON *brown field*
- Cenário de migração PON *green field*

O primeiro cenário de migração, PON *brown field*, refere-se à implementação num sistema PON já existente, onde os operadores de rede decidem aproveitar as infraestruturas já existentes de modo a oferecer maiores larguras de banda, através da utilização de XG-PON. Alguns subscritores do sistema G-PON podem requerer uma atualização do seu ritmo de transmissão, migrando para o sistema XG-PON, enquanto outros permanecem no sistema G-PON. Quando o número de subscritores G-PON reduzir de tal forma que não compense a coexistência das duas tecnologias, os operadores de rede podem forçar a sua migração para XG-PON. Geralmente este cenário de migração tem um período de tempo de coexistência relativamente longo, permitindo uma migração bastante lenta. No entanto, em casos extremos, os operadores de rede podem necessitar de substituir completamente o sistema G-PON por XG-PON. Neste caso, faz sentido a coexistência de ambos os sistemas, no entanto a atualização dos utilizadores é feita um de cada vez, o que torna o período de migração bastante mais pequeno. [19]

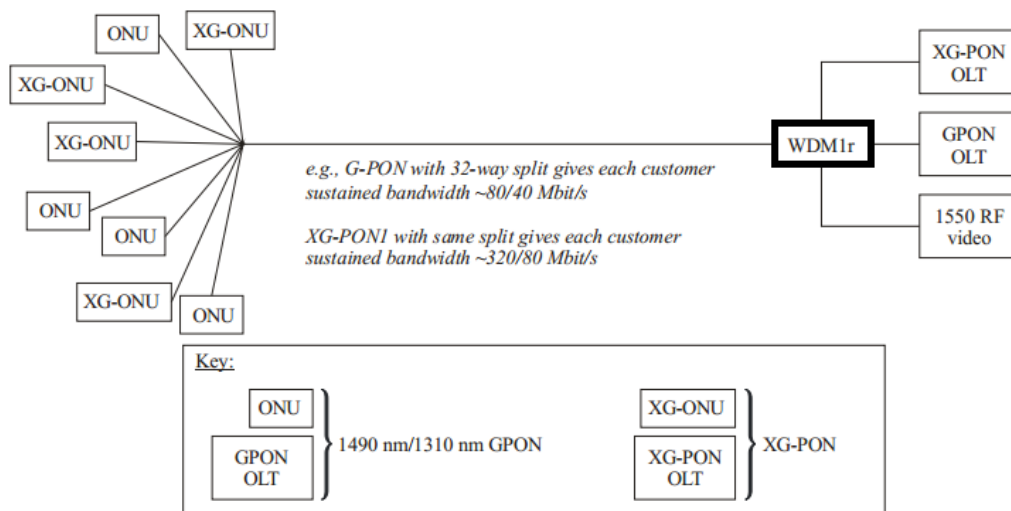


Figura 2.6.6 – Cenário de migração G-PON para XG-PON [19]

De modo a se alcançar uma migração com sucesso, além das OLT/ONUs XG-PON, é necessário instalar na rede um filtro WDM1r que é responsável por combinar (*downstream*) e isolar (*upstream*) tanto os sinais G-PON como as bandas de serviços de próxima geração.

O cenário de migração PON *green field* propõe uma renovação da rede de acesso para FTTx, não requerendo a coexistência com G-PON. Assim, este cenário é ideal para substituir infraestruturas baseadas em cobre ou para ser implantado numa

área onde XG-PON possa fornecer maior largura de banda e/ou maior *split* ratio. No entanto, o facto de neste cenário ser necessário um grande investimento por parte dos prestadores de serviços e de a migração puder ser bastante longa, torna este cenário de migração não muito atraente.

2.6.5 Questões de convivência XG-PON

Como já referido na secção 2.4.4 encontram-se especificados certos requisitos de isolamento e bandas de comprimento de onda de cada tecnologia para que as tecnologias possam conviver no mesmo ODN. Nesta secção pretende-se verificar a ocupação do espectro para cenários de convivência entre XG-PON, G-PON e vídeo.

Na recomendação G.987.1 encontram-se especificadas as tolerâncias à interferência entre sinais das ONUs XG-PON por forma a permitir a coexistência de XG-PON com serviços adicionais tais como G-PON e vídeo. Na Tabela 2.6.2 e Figura 2.6.7 encontra-se definido o plano de alocação de comprimentos de onda incluindo as bandas reservadas para os serviços adicionais. De notar a presença de uma banda de guarda que separa os sinais XG-PON de *upstream* e *downstream* dos sinais adicionais. No caso de convivência devem ser utilizados WBF por forma a obter o isolamento requerido fora da banda de guarda. [19]

Limite	Notação	Unidade	Valor nominal	Exemplo aplicação
XG-PON <i>Upstream</i>				Para utilização no <i>upstream</i> XG-PON
Inferior	-	nm	1260	
Superior	-	nm	1280	
Opção 1				Para utilização no <i>upstream</i> G-PON (Opção reduzida: 1290-1330 nm)
Inferior	λ_1	nm	1290	
Superior	-	nm	1330	
Opção 2				
Inferior	-	nm	1360	
Superior	-	nm	1480	
Opção 3				Para utilização no <i>downstream</i> G-PON (1480-1500 nm) e Vídeo (1550-1560 nm)
Inferior	-	nm	1480	
Superior	-	nm	1560	
XG-PON <i>Downstream</i>				Para utilização no <i>downstream</i> XG-PON
Inferior	-	nm	1575	
Superior	-	nm	1580	
Opção 4				
Inferior	λ_5	nm	1590	
Superior	λ_6	nm	1625	

Tabela 2.6.2 - Bandas de comprimento de onda definidas para convivência XG-PON com serviços adicionais [19]

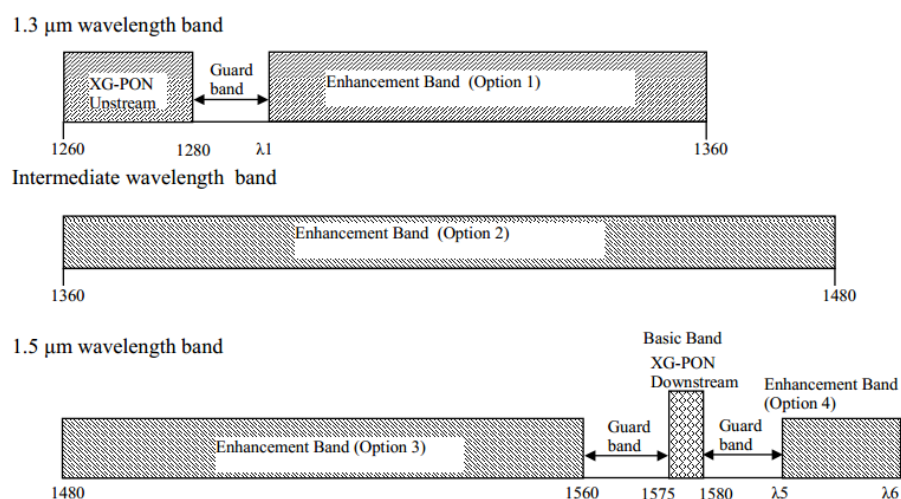


Figura 2.6.7 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência XG-PON com serviços adicionais [19]

A ocupação do espectro para os vários cenários de convivência de XG-PON com serviços adicionais tais como G-PON e vídeo encontra-se apresentada na Figura 2.6.8. De notar, que as bandas de guarda G-PON e vídeo foram definidas de acordo com a recomendação G.984.5.

	1260	1270	1280	1290	1300	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1415	1420	1430	1440		
XG-PON	UP XG-PON	B.G.	Opção 1										Opção 2									
XG-PON + G-PON	UP XG-PON	B.G.	UP G-PON					Opção 1					Opção 2									
XG-PON + G-PON + Video	UP XG-PON	B.G.	UP G-PON					Opção 1					Opção 2									
	Banda O											Banda E										
	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510	1520	1530	1535	1540	1550	1560	1565	1570	1575	1580	1590	1600	1610	1620	1625
XG-PON	Opção 2			Opção 3									Banda guarda	DS	B.G.	Opção 4						
XG-PON + G-PON	Banda de Guarda			DS G-PON			Banda de Guarda			Opção 3			Banda guarda	DS	B.G.	Opção 4						
XG-PON + G-PON + Video	Banda de Guarda			DS G-PON			Banda de Guarda			Opção 3			Banda guarda	DS	B.G.	Opção 4						
	E	Banda S								Banda C					Banda L						U	

Figura 2.6.8 – Bandas de comprimento de onda definidas para convivência XG-PON com serviços adicionais

Através da análise da Figura 2.6.8 é possível verificar que o cenário de coexistência entre XG-PON e G-PON se torna bastante interessante uma vez que a ausência do vídeo permite libertar a banda C quase na sua totalidade. Além da banda C, estão disponíveis a parte superior da banda O, a banda E e a banda L quase na sua totalidade.

Por sua vez, para o caso de coexistência entre XG-PON, G-PON e vídeo apenas ficam disponíveis a parte superior da banda O, a gama de 1530 a 1535nm da banda C e quase a totalidade da banda E e L.

2.7 NG-PON2

Os operadores pretendem minimizar as despesas de capital e os custos operacionais das suas redes de acesso. Por forma a rentabilizar ao máximo as suas redes, as suas redes de acesso devem fornecer uma maior largura de banda, maior alcance e suportar o máximo número de clientes.

Atualmente o grupo ITU-T tem definido na norma G.984.6 um *reach extender* que permite aumentar o *split ratio* e o alcance das suas redes G-PON até ao máximo definido na sua norma, 60 Km. Apesar de este equipamento permitir melhorar algumas das suas necessidades, este nem sempre é apreciado pelos operadores de rede uma vez que não permite providenciar maior largura de banda aos seus subscritores. Além disso, tem a desvantagem de introduzir um equipamento ativo na sua ODN. Assim, tal como já foi referido anteriormente a ITU desenvolveu também uma nova arquitetura de acesso, XG-PON, que permite a coexistência com G-PON e contribui também para o aumento da vida útil dos sistemas TDMA PON.

No entanto, devido à crescente necessidade de largura de banda por parte dos utilizadores, à mudança de serviços de vídeo de *broadcast* para *unicast* e devido à crescente difusão de aplicações multimédia de alta qualidade, novas soluções capazes de suportar taxas de transmissão superiores a 1 Gbps por utilizador já são alvo de atividades de investigação. Outros fatores importantes para a próxima geração de redes de acesso são também a existência de uma plataforma única para todo o tipo de aplicações e a minimização dos equipamentos ativos por forma a minimizar os custos operacionais das redes. Além disso, foram definidos requisitos para NG-PON2 para que esta tecnologia suporte também o crescimento de largura de banda devido à evolução dos serviços de vídeo, que se estima que em 2014 representarão cerca de 90% do tráfego global. Esta evolução dos serviços de vídeo é devida há: [4] [5]

- Evolução dos formatos de televisão atuais, SDTV e HDTV, para os formatos Super HD, Ultra HD e 3D;
- Crescimento do tráfego devido a chamadas vídeo;
- Aumento do número de dispositivos ligados a uma rede;
- Aumento da popularidade das redes sociais e da partilha de conteúdos vídeo, e consequente *upload* e *streaming* desses mesmos conteúdos;
- Aumento dos jogos *online*.

Assim, foram definidos alguns requisitos gerais para NG-PON2, que se espera que sejam cumpridos até 2015: [4]

- 40 Gbps de capacidade agregada no sentido *downstream*;
- 10 Gbps de capacidade agregada no sentido *upstream*;
- *Split ratio* de pelo menos 1:64;
- 20 Km de alcance básico da rede;
- Pelo menos 60 Km devem ser atingidos com *reach extender* (caso necessário);
- Elevados níveis de segurança e integridade dos dados dos utilizadores;

- Configuração simples (*plug and play*) dos equipamentos nas residências dos utilizadores;
- Redução dos custos operacionais sem sacrifício da qualidade do serviço e da experiência do utilizador;
- Reutilização ao máximo das infraestruturas atualmente implantadas;
- ONUs *colorless* de modo a facilitar requisitos de flexibilidade espectral.

2.7.1 Tecnologias candidatas para NG-PON2

2.7.1.1 TWDM-PON (*Time and Wavelength Division Multiplexed-PON*)

2.7.1.1.1 Arquitetura

A arquitetura básica de um sistema TWDM-PON encontra-se apresentada na Figura 2.7.1, e consiste em quatro XG-PON agregadas através da utilização de quatro pares de comprimentos de onda diferentes. Tipicamente este sistema utiliza um *split ratio* de 1:64, e é capaz de fornecer 40 Gbps de tráfego agregado no sentido *downstream* e 10 Gbps no sentido *upstream*. Neste sistema, as ONUs devem ser *colorless* para que os seus recetores sejam capazes de sintonizar qualquer dos comprimentos de onda de *downstream*, e os seus transmissores capazes de sintonizar qualquer dos comprimentos de onda de *upstream*. Caso se pretenda orçamentos de potência superiores ao disponível em redes XG-PON, pode-se utilizar amplificadores óticos na OLT, permanecendo desta forma toda a ODN passiva. Assim, as tecnologias chave desta arquitetura são o transmissor e o filtro sintonizável presentes na ONU. [22]

A OLT é capaz de multiplexar e demultiplexar os múltiplos comprimentos de onda. Por sua vez cada ONU opera a comprimentos de onda de transmissão e receção distintos e seleccionados. Assim, caso diversas ONUs necessitem do mesmo conteúdo, a OLT terá que duplicar o tráfego e o enviar nos comprimentos de onda de receção das ONUs em questão.

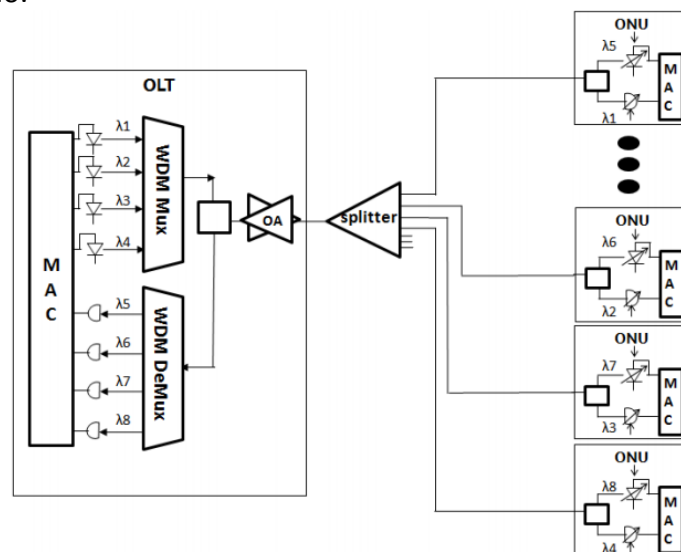


Figura 2.7.1 – Arquitetura de um sistema TWDM-PON [22]

Nesta arquitetura devido ao facto de ser constituída por quatro XG-PON agregadas tem uma relação de largura de banda proposta igual à desse sistema, ou seja, de 1:4. Isto significa, que um número igual de comprimentos de onda de *upstream* e *downstream* são utilizados para transportar os sinais XG-PON. No entanto, caso seja necessário, a assimetria de largura de banda pode ser variada tanto através da variação dos comprimentos de onda utilizados como pela exploração de taxas de linha mais elevadas.

2.7.1.1.2 Gama de comprimentos de onda de trabalho

O sistema TWDM-PON não apresenta requisitos especiais relativos à gama de comprimentos de onda de trabalho, existindo várias possibilidades para a utilização desta tecnologia.

A primeira opção reutiliza as bandas de comprimentos de onda XG-PON, definindo um espaçamento mais pequeno dentro das bandas previamente definidas. Desta forma, esta opção permite aproveitar o trabalho que tem sido desenvolvido para esta norma. Assim, a utilização destes comprimentos de onda de trabalho permite que esta tecnologia seja compatível com a norma G-PON e com *Video Overlay*, bloqueando no entanto a norma XG-PON. Um exemplo desta primeira opção, com um espaçamento entre comprimentos de onda de 200 GHz encontra-se apresentado na Figura 2.7.2.[22]

O facto de atualmente já existirem lasers comerciais com controlo de temperatura que suportam este plano de comprimentos de onda, torna esta opção viável.

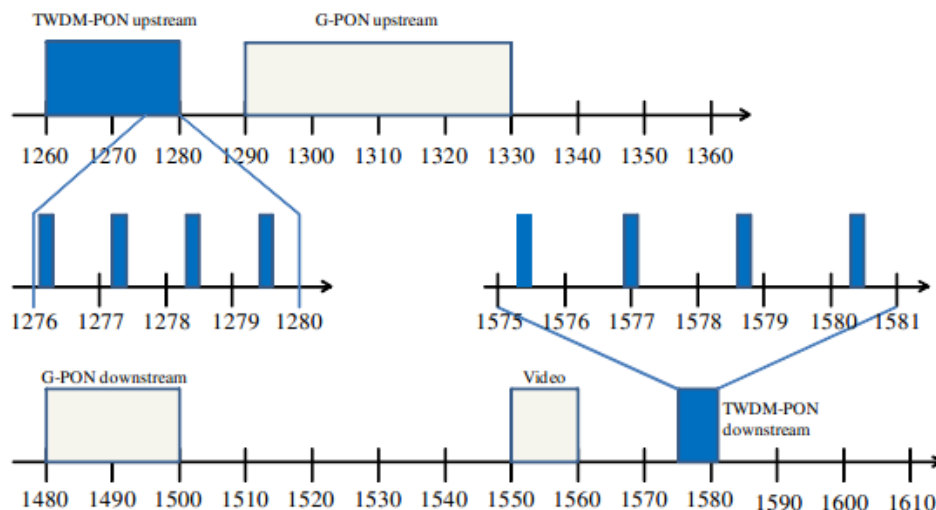


Figura 2.7.2 – Comprimentos de onda de trabalho: Reutilização de comprimentos de onda XG-PON [22]

A segunda opção redefine a banda C, de modo a que esta contenha os comprimentos de onda de *downstream* e *upstream*. A utilização destes comprimentos de onda de trabalho permite que esta tecnologia seja compatível com a norma G-PON e XG-PON, bloqueando no entanto o *Video Overlay*. [22]

Esta opção tem características óticas atrativas uma vez que permite a amplificação dos sinais através da utilização de EDFAs. Além disso, a atenuação nesta gama de comprimentos de onda é bastante baixa. Por estes motivos, este sistema possui um maior orçamento de potência e permite atingir maiores distâncias que o anterior. Um exemplo desta segunda opção encontra-se apresentado na Figura 2.7.3.

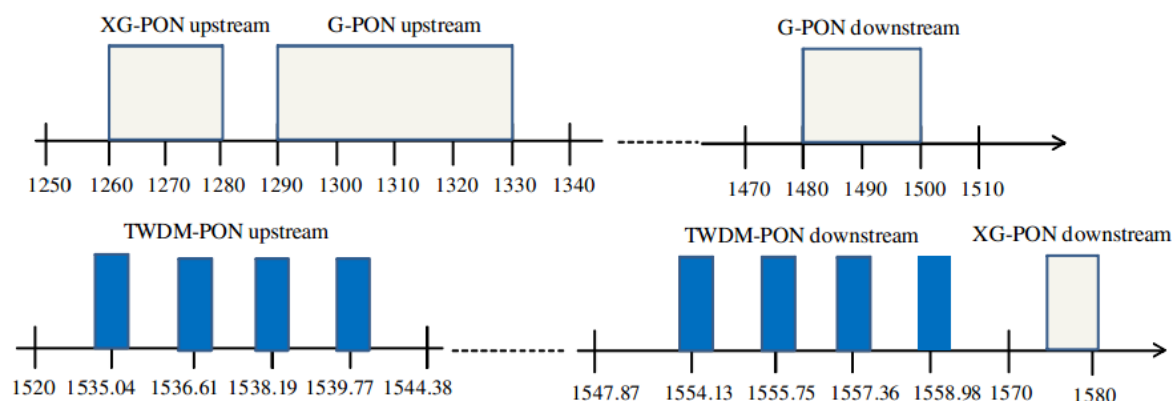


Figura 2.7.3 – Comprimentos de onda de trabalho: Redefinição da banda C [22]

Estes dois planos de comprimentos de onda são os preferidos para a utilização da tecnologia TWDM-PON uma vez que permitem convivência com tecnologias anteriores e além disso permitem reutilizar equipamentos já existentes. Contudo, existem ainda outras opções para a utilização desta tecnologia.

Por exemplo, a utilização da parte superior da banda O (p.e. 1340-1360 nm) para o *upstream* e a banda chamada *water peak* – ver A.2.1 - (p.e. 1425-1435 nm) para o *downstream*. A utilização destas bandas de comprimentos de onda, apesar de permitir a convivência com G-PON, XG-PON e *video overlay*, requer a utilização de fibras com um baixo *water peak* (G.652.C/D) por forma a minimizar a atenuação da fibra nesta gama de comprimentos de onda. Além disso, requer ainda a utilização de filtros adicionais. [23] [24]

Uma outra possibilidade para a utilização desta tecnologia consiste na utilização das bandas de *enhancement* definidas na norma XG-PON. Por exemplo, a utilização da gama de 1595-1610 nm para o *downstream* e a gama de comprimentos de onda de 1340-1360 nm ou 1515-1535 nm para o *upstream*. Nesta segunda opção, uma vez que os comprimentos de onda de *upstream* se encontram perto dos comprimentos de onda G-PON e de *video overlay*, a sua compatibilidade com estes depende somente das características de isolamento dos filtros utilizados. Outra possibilidade é a utilização da gama disponível de 1530-1535 nm para o *downstream* ou *upstream* desta tecnologia, uma vez que é compatível com todas as tecnologias anteriores.

Desta forma pode-se concluir que a tecnologia TWDM-PON não tem requisitos especiais relativamente aos comprimentos de onda que utiliza. Encontrar um conjunto de comprimentos de onda, tendo sempre em consideração a possível coexistência com as tecnologias já existentes e a reutilização de componentes comerciais, terá que ser a opção a tomar por parte dos operadores.

2.7.1.1.3 Cenários de Migração e Coexistência

A coexistência desta tecnologia com os sistemas anteriores PON é baseada em WDM e funciona tal como a coexistência de XG-PON com G-PON.

Na Figura 2.7.4 é apresentado o cenário de migração e coexistência para a primeira opção apresentada no subcapítulo anterior. Neste cenário, em que os comprimentos de onda XG-PON são reutilizados para a tecnologia TWDM-PON, os sistemas G-PON e *vídeo overlay* podem migrar e coexistir com esta tecnologia. Esta tecnologia permite que o filtro WDM utilizado nos sistemas XG-PON – Filtro WDM1r – seja utilizado para a transmissão conjunta da tecnologia TWDM-PON.

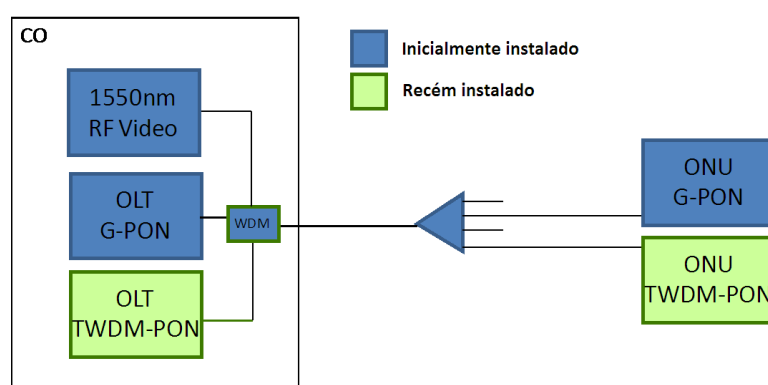


Figura 2.7.4 – Cenário de migração e coexistência (Opção 1): Reutilização de comprimentos de onda XG-PON

O cenário de migração e coexistência para a segunda opção do subcapítulo anterior é apresentado na Figura 2.7.5. Este cenário, que utiliza a banda C para a tecnologia TWDM-PON permite a migração e coexistência com G-PON e XG-PON. Além disso, tal como o cenário anterior, permite a reutilização do filtro WDM1r utilizado no sistema XG-PON.

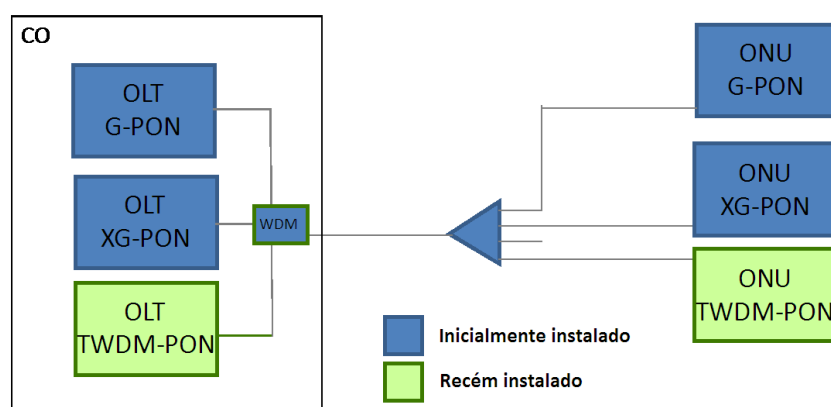


Figura 2.7.5 – Cenário de migração e coexistência (Opção 2): Redefinição da banda C

Se numa determinada área, TWDM-PON é o primeiro serviço de banda larga disponível, não existem requisitos especiais relativos à gama de comprimentos de onda de trabalho a ser utilizada. Assim, a aplicação desta tecnologia num cenário *green field* permite que os operadores não tenham grandes preocupações relativas ao *water peak* das fibras implantadas, nem preocupações com a característica de isolamento dos filtros uma vez que não é necessária compatibilidade com nenhuma tecnologia anterior.

2.7.1.2 WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexed - PON*)

2.7.1.2.1 Arquitetura

A característica que define um sistema WDM-PON é que cada ONU é servida por um ou mais comprimentos de onda dedicados. Na Figura 2.7.6 encontra-se apresentada de uma forma abstrata a arquitetura de um sistema WDM-PON.

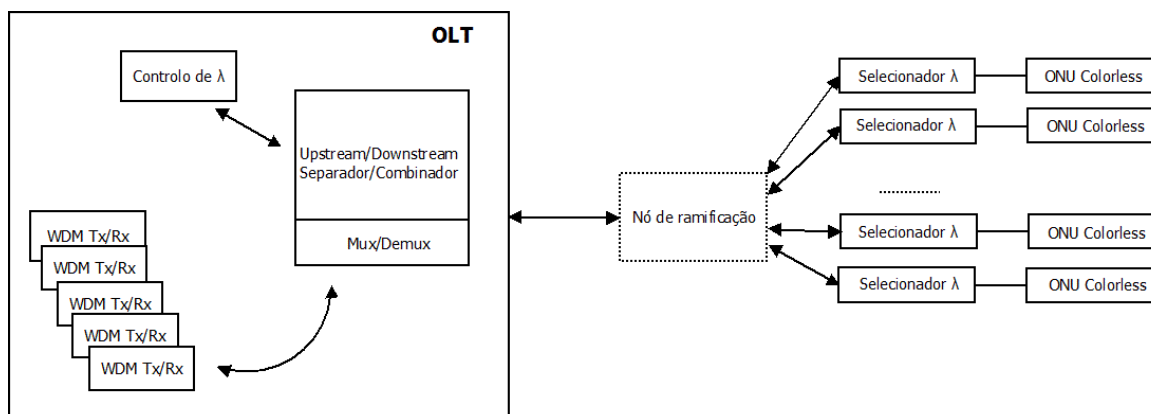


Figura 2.7.6 – Arquitetura abstrata WDM-PON

Um número de componentes Tx/Rx mapeiam os sinais dos clientes da rede PON em comprimentos de onda distintos, que são depois multiplexados numa única fibra. A OLT possui também um bloco de controlo de comprimento de onda por forma a controlar os comprimentos de onda transmitidos e recebidos e a verificar a conectividade das ONUs.

No nó de ramificação a ODN é ramificada através de fibras individuais que ligam a cada ONU. O nó de ramificação pode ser constituído por uma combinação qualquer dos seguintes componentes: *splitters* óticos, filtros passa banda, filtros rejeita banda e filtros de comprimentos de onda (AWG). Por fim, entre cada porta do nó de ramificação e cada *transceiver colorless* da ONU é utilizado um selecionador de comprimento de onda.

A cada ONU é atribuído um comprimento de onda em cada direção, podendo os comprimentos de onda de *upstream* e *downstream* serem os mesmos ou pertencerem a gamas de comprimento de onda diferentes. Cada ONU adapta-se automaticamente a cada comprimento de onda, sem que sejam necessários diferentes lasers por comprimento de onda, o que permite aos operadores de telecomunicações uma redução dos custos operacionais das suas redes.[25]

Encontram-se definidos dois tipos de classes de redes óticas passivas WDM: *wavelength-routed* (WR) e *wavelength-selected* (WS).

Numa rede WDM-PON da classe WR (Figura 2.7.7) o selecionador de comprimento de onda faz parte do nó de ramificação. Nesta rede o comprimento de onda atribuído a cada ONU é determinado pela sua conexão física à ODN, como por exemplo de acordo com a porta do AWG a que a ONU se encontra ligada.

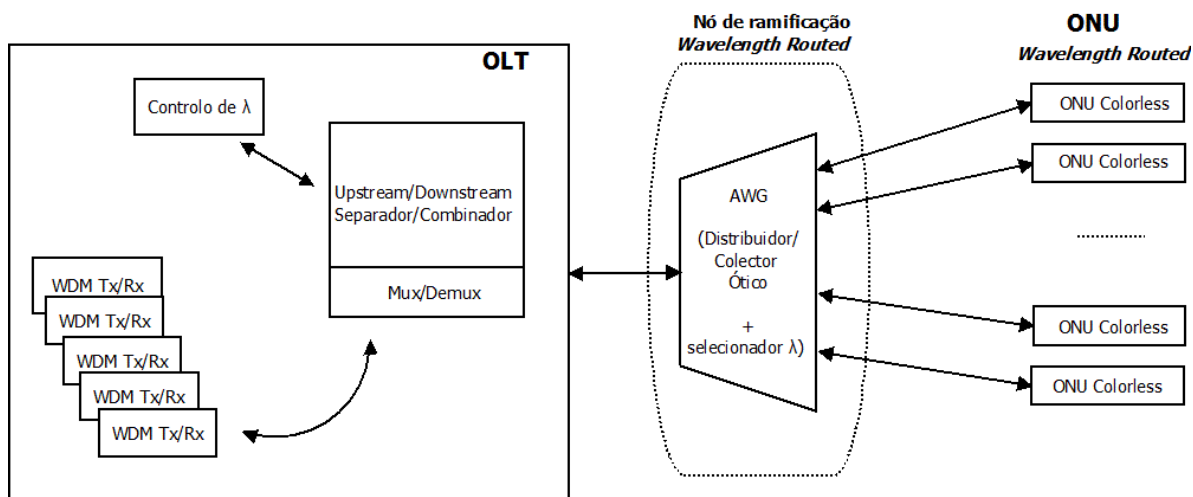


Figura 2.7.7 – Arquitetura WDM PON: Classe *Wavelength-Routed*

Já numa rede WDM PON da classe WS (Figura 2.7.8) o seccionador de comprimento de onda é embutido na ONU. Nesta classe, parte ou a totalidade do espectro está disponível para a ONU (*splitter* com ou sem filtro passa banda) de tal modo que é possível para a ONU e OLT comunicar em parte ou na totalidade do espectro. Por sua vez, nesta classe, o comprimento de onda da ONU é determinado no processo de ativação da ONU, o qual envolve também a OLT.

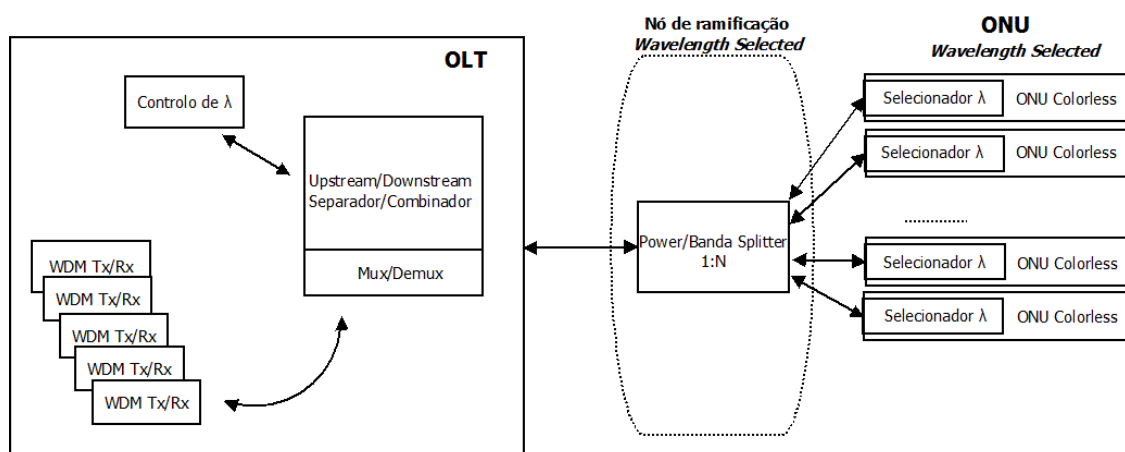


Figura 2.7.8 – Arquitetura WDM PON: Classe *Wavelength-Selected*

Além disso, uma rede WDM-PON pode possuir também uma ODN híbrida constituída por um AWG seguido por um *splitter* passivo ou vice-versa. Nesta rede, o nó de distribuição pode conter ambos os elementos num único local, ou em locais distintos.

2.7.1.2.2 Gama de comprimentos de onda de trabalho

O sistema WDM-PON não apresenta requisitos especiais relativos à gama de comprimentos de onda de trabalho. Um componente central de sistemas WDM é o multiplexer/demultiplexer de comprimento de onda. Estes componentes são implementados com dispositivos AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*). [26]

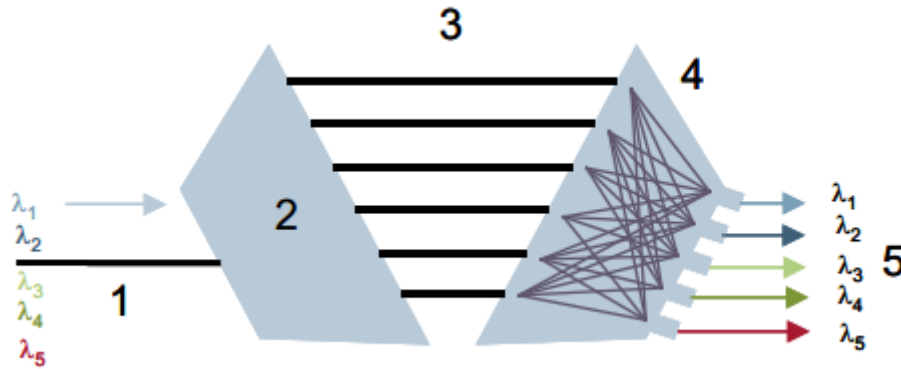


Figura 2.7.9 – Dispositivo AWG [26]

O funcionamento deste dispositivo baseia-se em cinco passos: quando a luz é recebida por todos os comprimentos de onda atravessa um espaço livre (1), entra na série de guias de onda do canal (2), onde cada um tem um tamanho diferente (3); como cada guia tem comprimentos de onda diferentes, significa que os comprimentos de onda de saída têm diferentes fases; cada sinal atravessa um outro espaço livre (4), e com base no princípio de interferência de ondas de luz, cada porta de saída receberá um só comprimento de onda (5). O mesmo processo pode-se repetir no sentido contrário. [26]

Os sistemas WDM são classificados em dois grupos com base no espaçamento de comprimentos de onda multiplexados:

- Sistemas *coarse* WDM (CWDM)
- Sistemas *dense* WDM (DWDM)

A ITU especificou um espaçamento de grade para os sistemas CWDM de 20 nm. Por sua vez, para sistemas DWDM a ITU especificou uma grade que consiste em 0,8 nm (100 GHz) de espaçamento entre canais. Além disso, para que fosse mais prática esta grade foi estendida para fornecer 0,4 nm (50 GHz) e 0,2 nm (25 GHz). Atualmente, alguns sistemas comerciais de DWDM utilizam a grade de 25GHz, permitindo fornecer até 160 comprimentos de onda na banda C e 160 comprimentos de onda na banda L. [26]

Os sistemas CWDM são menos sofisticados que os DWDM e, portanto, menos caros do que os sistemas DWDM. Um transmissor típico para estes sistemas é um laser Fabry Perot. Por sua vez, os lasers utilizados em sistemas DWDM devem ser mais estáveis do que os que se utilizam nos sistemas CWDM, devido ao espaçamento entre canais ser menor. Estes também devem ser projetados com controlo preciso da temperatura para evitar dispersão do comprimento de onda central muito estreito.[26]

Devido à natureza cíclica dos AWG, é possível estender a banda de comprimento de onda na qual se pode operar sem aumentar as perdas no nó de ramificação, a complexidade e o custo. Neste momento encontram-se disponíveis comercialmente AWGs cíclicos de 100 GHz para as bandas O, E, S, C, L e U. No entanto,

é expectável que este sistema utilize a banda C e L, ou somente uma delas, podendo o *upstream* e *downstream* pertencer a regiões espectrais distintas ou partilhar a mesma banda espectral.

De acordo com as bandas de guarda definidas para os sistemas G-PON, XG-PON e vídeo definidas nos capítulos anteriores e assumindo a utilização de AWG cíclico com 100 GHz de espaçamento foi efetuado o cálculo do número de canais disponível em cada uma das bandas para vários cenários de coexistência. Os valores apresentados foram calculados tendo em conta a recomendação G.694.1 que define a grelha de frequências para DWDM.

	1260	1270	1280	1290	1300	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1415	1420	1430	1440								
G-PON, WDM-PON				UP G-PON						145 canais disponíveis																		
G-PON, WDM-PON, Vídeo				UP G-PON						145 canais disponíveis																		
G-PON, XG-PON, WDM-PON	UP XG-PON	B.G.	UP G-PON						145 canais disponíveis																			
G-PON, XG-PON, WDM-PON, Vídeo	UP XG-PON	B.G.	UP G-PON						145 canais disponíveis																			
	Banda O											Banda E																
	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510	1520	1530	1535	1540	1550	1560	1565	1570	1575	1580	1590	1600	1610	1620	1625	1630	1640	1650	1660	1670	1675
G-PON, WDM-PON	Banda de guarda		DS G-PON		Banda de guarda			40 canais disp.				55 canais disponíveis								40 canais disp.								
DS G-PON			7 15-nm Vídeo 15-nm					49 canais disponíveis				40 canais disp.																
DS G-PON			33 canais disp. Banda guarda DS B.G.					23 canais disp.				40 canais disp.																
DS G-PON			7 15-nm Vídeo 15-nm DS B.G.					23 canais disp.				40 canais disp.																
E	Banda S						Banda C				Banda L				Banda U													

Figura 2.7.10 – Comprimentos de onda de operação para tecnologia WDM-PON em cenários convivência

Neste momento, existem alguns tipos de ONUs que utilizam dispositivos reflexivos, como por exemplo baseados em RSOA (*Reflexive Semiconductor Optical Amplifier*), que tornam a arquitetura mais rentável uma vez que eliminam a necessidade de um laser caro no sentido *upstream*. Além disso, existem já algumas ONUs que suportam um espaçamento de frequências flexível, o que permite uma migração de um espaçamento entre comprimentos de onda menos denso para um mais denso sem ser necessário efetuar alterações na ONU.[27]

2.7.1.2.3 Cenários de Migração e Coexistência

A tecnologia WDM-PON requer alguns melhoramentos nos ODNs existentes atualmente para que a sua operação seja possível com as tecnologias existentes atualmente. Esta tecnologia providencia uma largura de banda simétrica lógica ponto a ponto sobre uma infraestrutura física ponto-multiponto.[25]

De modo a maximizar o investimento nas ODN existentes atualmente, os operadores procuram a coexistência com as tecnologias já existentes como G-PON, XG-PON e vídeo. Os filtros WDM1r e WDM1rn definidos na recomendação G.984.5 podem ser utilizados para cenários de WDM-PON que utilizem a banda C para o caso de coexistência com GPON. [25] No entanto, para o caso de coexistência com XG-PON, é necessário efetuar alterações no filtro WDM1r. O mesmo sucede para o caso de o filtro WDM1r não ser compatível com a banda de comprimento de ondas selecionada para WDM-PON. Um exemplo de convivência de WDM-PON com apenas uma das tecnologias PON (G-PON ou XG-PON) e vídeo encontra-se apresentado na Figura 2.7.11. Na figura o filtro encontra-se designado por WDM1new devido ao facto de

puder ser necessária a alteração do filtro WDM1r consoante a banda de funcionamento da tecnologia WDM-PON.

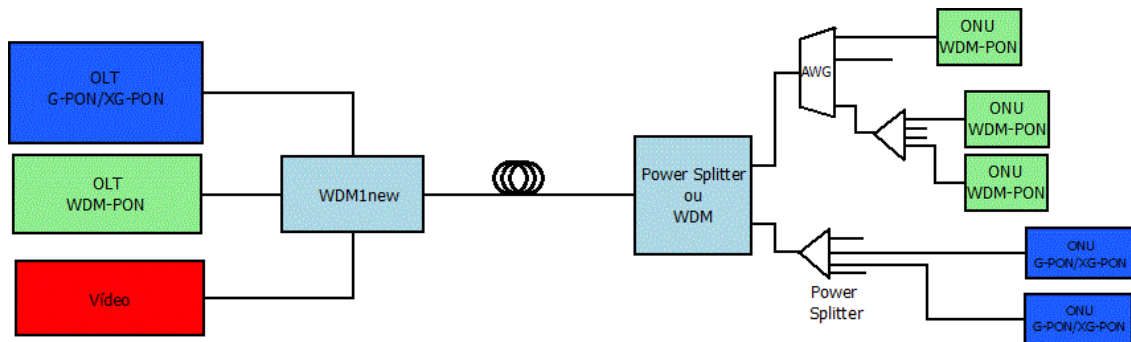


Figura 2.7.11 – Convivência entre as tecnologias G-PON/XG-PON, WDM-PON e Vídeo

2.8 RF Video Overlay

RF Video Overlay é uma tecnologia utilizada para a transmissão de vídeo que providencia vários benefícios tanto para os operadores das redes PON, como para os subscritores das mesmas. Esta tecnologia é utilizada para a transmissão de vídeo em *broadcast*, permitindo que toda a capacidade disponível para a transmissão de dados seja utilizada apenas para serviços de *unicast*. Dados os requisitos cada vez mais elevados ao nível da latência da rede e crescente qualidade dos serviços vídeo, a transmissão num comprimento de onda em separado é adequada uma vez que permite uma redução dos requisitos de capacidade e performance da rede relativamente ao transporte de dados. Além disso, permite aos operadores de rede o transporte de vídeo no seu formato *standard* analógico ou digital.

Tal como já foi referido anteriormente, nas normas G-PON e XG-PON a gama de comprimentos de onda de 1550-1560 nm encontra-se reservada exclusivamente para a transmissão de vídeo. Esta gama é utilizada uma vez que a atenuação da fibra nesta região é baixa e uma vez que permite a utilização de amplificadores de fibra dopada de érbio (EDFA), que são os mais adequados para a amplificação dos sinais de vídeo uma vez que possuem uma figura de ruído baixa em comparação com os SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*). Além disso, a ITU-T definiu a norma G.983.3 para a transmissão de vídeo juntamente com sinais de dados. Nesta norma, encontra-se definido o valor mínimo de CNR (*Carrier-to-Noise Ratio*) de 16 dB para a transmissão de vídeo com o formato de modulação QPSK e de 34 dB para a transmissão de vídeo utilizando o formato de modulação 256 QAM. [28]

Um dos métodos que se utiliza para aumentar o alcance da transmissão vídeo consiste em pré amplificar o sinal vídeo. Na norma G.983.3 encontra-se definido o limite máximo de potência do vídeo de 17 dBm para fibras SMF, uma vez que excedendo esse limite poderá ocorrer um fenómeno não linear designado por SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*). [28]

2.8.1 Televisão Digital

Na televisão analógica os efeitos do ruído podem ser imediatamente vistos no sinal de vídeo analógico. Isto não acontece na televisão digital, devido à natureza da sua transmissão. Os diversos *standards* de televisão digital permitem fornecer vídeo e áudio de melhor qualidade aos seus utilizadores, permitindo eliminar o ruído e distorções comumente presentes nos sinais de televisão analógica. A televisão digital possibilita também o fornecimento de novas funcionalidades e serviços, tais como:

- Televisão de alta definição (HDTV) com maior resolução e formato da imagem *widescreen*;
- Áudio *surround* 5.1;
- *Multicasting* – Fornecimento de múltiplos programas de *Standard Definition Television* (SDTV) e/ou HDTV em apenas um canal de transmissão.

Um canal de televisão digital tanto pode transportar programação SDTV ou HDTV, como pode transportar ambas as programações simultaneamente. Por sua vez, o número de sinais de televisão digitais transportados depende da largura de banda atribuída para cada sinal.

O sistema de televisão digital pode ser visto como um conjunto de definições, que torna possível a construção de dispositivos para a transmissão e receção de televisão digital. Baseado nestas definições, uma estação de televisão transmite o sinal vídeo, codificado digitalmente, usando um determinado formato de modulação para os recetores (embutidos ou não na televisão) que após a receção dos sinais, procedem a sua descodificação por forma a exibi-los na televisão.

Na maioria dos sistemas de televisão digital é utilizado o mecanismo de transporte MPEG-2 para a transmissão do vídeo digital com dados agregados. MPEG-2 é o conjunto de normas e definições relativos à codificação e compressão do áudio e vídeo, que utiliza MPEG-2 *Transport Stream* (MPEG-2 TS) para o empacotamento e multiplexagem do vídeo, áudio e aplicações de dados a ser transmitidas sobre diferentes tipos de redes, tais como: redes terrestres, cabo ou satélite. Cada MPEG-2 TS consiste numa sequência de pacotes de transporte de tamanho fixo de 188 bytes.

Entre os sistemas existentes atualmente que utilizam este sistema de compressão destacam-se as normas DVB (*Digital Video Broadcasting*) que se encontram implementadas em grande escala em todo o mundo. Dessas normas destacam-se DVB-S (*DVB-Satellite*), DVB-C (*DVB-Cable*), DVB-T (*DVB-Terrestrial*). [29][30]

2.8.2 DVB-S

A receção de televisão via satélite é bastante comum em muitos países, uma vez que este tipo de instalação torna-se extremamente simples, barata e porque permite que muitos canais estejam disponíveis gratuitamente tanto na forma analógica como digital.

O sistema DVB-S utiliza o método de modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) uma vez que as transmissões via satélite necessitam de um formato de modulação robusto, que seja capaz de lidar com o ruído intenso na propagação dos sinais e com as não-linearidades existentes na característica de modulação do elemento ativo presente no *transponder* do satélite - TWA (*Travelling Wave Amplifier*). [31]

Um sistema DBS (*Direct Broadcasting Satellite*) utiliza na maioria dos casos canais com uma largura de banda de 26 MHz a 36 MHz e utiliza uma taxa de símbolos de 27.5 MS/s. Uma vez que o formato de modulação QPSK permite a transmissão de dois bits por símbolo, os dados serão transmitidos a 55 Mbps. Nesta norma, o transporte de sinais de televisão digital é feito utilizando a banda de frequências de 950 a 2050 MHz. [31] [32]

Por forma a lidar com bastantes erros, neste sistema são utilizados dois mecanismos de correção para proteger cada MPEG-2 TS. Por esse motivo, é utilizado o código RS(204,188), seguido de um código convolucional. [31] Com a utilização de FEC, informação redundante é transmitida juntamente com a informação original, o que faz com a taxa de transmissão disponível para a transmissão via satélite seja reduzida e dependente da taxa de codificação de ambos os métodos de correção de erros. O fluxo de dados codificado é então baralhado antes de entrar no canal de transmissão para que durante a transmissão sejam detetados e corrigidos um dado número de erros. A única desvantagem da utilização destes mecanismos de correção prende-se com o facto de estes reduzirem a taxa de transmissão efetiva do sistema. A utilização do código RS(204,188) reduz a taxa de transmissão efetiva para 50.69 Mbps. Se a isso for adicionado o código convolucional com uma taxa de codificação de $\frac{3}{4}$, obtém-se uma taxa de transmissão efetiva de 38.01 Mbps. [31]

Após isto, os símbolos são mapeados na constelação QPSK e de seguida é aplicado um filtro por forma a limitar a largura de banda requerida e otimizar a performance da cadeia de transmissão global. Por forma a evitar problemas de interferência entre símbolos o filtro deve satisfazer o primeiro critério de Nyquist, de modo a que a sua resposta temporal apresente zeros a tempos múltiplos do período do símbolo (T). O filtro mais comumente usado é o filtro cosseno elevado (*raised cosine filter*). Este filtro é caracterizado pelo seu fator de *roll-off* (α), que define a sua inclinação. De seguida, são apresentadas as respostas temporal e em frequência deste

filtro (normalizadas para a taxa de símbolos) para três valores do fator de *roll-off* (0.2, 0.35 e 0.5). Na resposta temporal pode ser verificada a presença de zeros a instantes múltiplos do período do símbolo por forma a reduzir a interferência entre símbolos. Nesta norma encontra-se definido um filtro com um fator de *roll-off* de 0.35. [31][32]

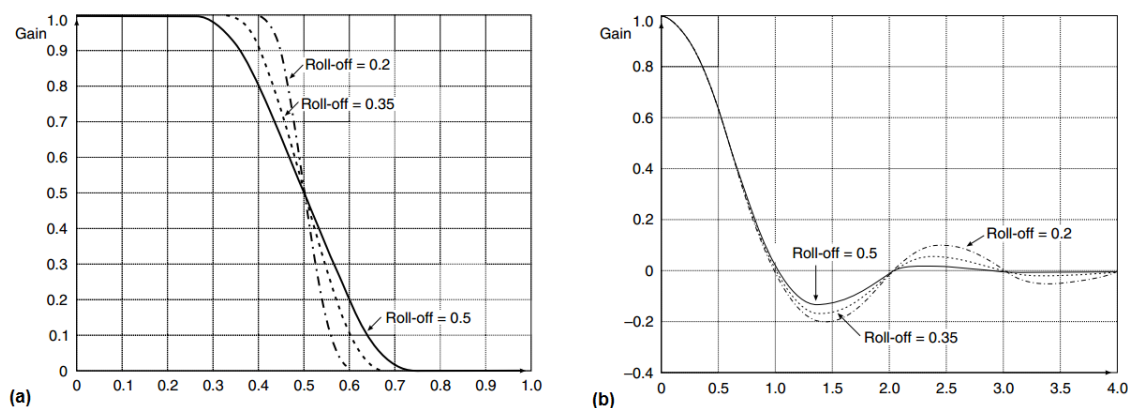


Figura 2.8.1 – (a) Resposta em frequência; (b) resposta temporal; do Filtro cosseno elevado para três valores do fator de *roll-off* (0.2, 0.35 e 0.5)[32]

2.8.3 DVB-C

A distribuição de sinais de televisão tanto analógicos, como digitais, por cabo é muito comum em muitos países, permitindo a distribuição de um número elevado de canais de televisão. A transmissão de televisão digital por cabo (cabo coaxial ou fibra ótica) é efetuada utilizando a norma DVB-C. Nesta norma, o transporte de sinais de televisão digital é feito utilizando a banda de frequências de 47 a 862 MHz. [31]

A transmissão por cabo exibe uma melhor relação sinal-ruído que a transmissão via satélite uma vez que o meio de transmissão é muito menos propenso ao ruído e não tem que lidar com problemas de reflexões do sinal, o que permite a utilização de métodos de modulação digital de maior qualidade.

Quando a transmissão dos sinais de televisão digital é feita via cabo coaxial o método de modulação habitualmente utilizado para o transporte dos fluxos MPEG-2 é 64-QAM. Por outro lado, quando a transmissão é feita via fibra ótica é frequentemente utilizada modulação 256-QAM. [31]

Por forma a lidar com os erros, este sistema utiliza apenas um mecanismo de correção de erros, RS(188,204), de modo a proteger cada MPEG-2 TS. [31]

Na norma DVB-C encontram-se previstas as seguintes modulações: 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM e 256-QAM. Nesta norma, os canais possuem uma largura de banda de 8MHz, e é utilizado o valor do fator de *roll-off* do filtro de 0.15. [31][32]

Assim, devido à utilização de formatos de modulação de ordem superior e ao facto de ser utilizado FEC é possível providenciar uma elevada taxa de transmissão em qualquer canal genérico de televisão analógica de 8 MHz. [31]

2.8.4 DVB-T

A norma DVB-T utiliza COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*) para modular os fluxos MPEG-2 de modo a fornecer uma modulação hierárquica, que permite transmitir os mesmos programas com diferentes taxas de transmissão, diferentes FEC e diferente qualidade de vídeo num único canal DVB-T. Na modulação hierárquica a informação é transmitida por meio de dois métodos de transmissão diferentes dentro de um espectro COFDM. Um dos meios de transmissão, chamado de alta prioridade, utiliza uma taxa de transmissão dos dados baixa, mas permite uma melhor proteção aos erros ou a utilização de um tipo de modulação mais robusto (QPSK). Já o outro meio de transmissão é chamado de baixa prioridade e é utilizado para a transmissão do MPEG2-TS com uma taxa de transmissão superior, com uma menor proteção aos erros e utilizando um tipo de modulação de ordem superior (16QAM, 64QAM). [31]

Um canal DVB-T pode ter uma largura de banda de 6, 7 ou 8 MHz e operar no modo 2K (2046 subportadoras) ou no modo 8K (8192 subportadoras). O modo de 2K possui um espaçamento entre subportadoras de aproximadamente 4 kHz, mas o período de símbolo é muito mais curto. Por esse motivo, em comparação com o modo 8K, que possui um espaçamento entre subportadoras de aproximadamente 1 kHz, o modo 2K é mais suscetível a atrasos, mas é menos suscetível ao espalhamento no domínio da frequência (efeito Doppler). [31]

Por forma a lidar com os erros, nesta norma é utilizado o mesmo mecanismo de correção de erros que na norma DVB-S. Assim, é utilizado o código RS(188,204) seguido de um código convolucional, por forma a proteger cada MPEG-2 TS. Além disso, a transmissão nesta norma pode ser adaptada às exigências no que diz respeito à robustez ou taxas de transmissão dos dados através do ajuste da taxa de codificação do código convolucional. [31]

3 Estudo da interferência devida à dinâmica do efeito de Difusão Estimulada de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) sobre o vídeo em ambientes de convivência com sinais NRZ

3.1 Introdução

Sub-carrier multiplexing (SCM) é uma técnica utilizada para a transmissão de vários sinais de áudio, vídeo e dados sobre um meio de transmissão, representando a solução mais simples e económica para a implementação de redes de banda larga. [33] Neste momento, esta técnica é aplicada para a transmissão de sinais RF na tecnologia RoF (*Radio over Fiber*), reduzindo a complexidade e baixando os custos de instalação das estações base, e permitindo providenciar comunicações *wireless* suportadas através de fibras óticas. [34]

Os sistemas CATV (*Cable Television*) utilizam um único transmissor para enviar um sinal vídeo com vários canais desde um *headend* para um ou mais nós da fibra. Nestes sistemas de um único comprimento de onda, podem ser utilizados amplificadores óticos para aumentar o número de nós que partilham um transmissor e que recebem o mesmo sinal de *broadcast*. Mais recentemente, os operadores necessitam de selecionar e limitar a informação que difundem de acordo com os interesses de cada segmento do seu público-alvo. Assim, é necessário um sistema onde diferentes conjuntos de subscritores sejam servidos por um único *headend* capaz de transmitir diferentes sinais. Este desejo de adicionar flexibilidade à rede acoplado com o sucesso generalizado dos sistemas WDM levou a exploração e implantação de sistemas WDM para a distribuição de CATV. [35]

A transmissão de vídeo digital usando SCM com formatos de modulação como M-QAM e QPSK, oferece grande flexibilidade e necessita de menor largura de banda quando comparada com a transmissão de vídeo utilizando uma portadora digital. Uma vez que a arquitetura PON pode ser utilizada para a transmissão de vídeo utilizando a técnica de SCM e devido às vantagens anteriormente enunciadas é expectável que a próxima geração de redes óticas de acesso utilizem SCM para a transmissão de vídeo. Neste caso, a arquitetura de acesso baseada em SCM e WDM para a distribuição de informação em conjunto com amplificação ótica providencia uma elevada largura de banda, flexibilidade, escalabilidade e longo alcance. [34]

Na transmissão de múltiplos comprimentos de onda os efeitos das não linearidades da fibra como modulação de fase cruzada (XPM) e difusão estimulada de Raman (SRS) tornam-se significativos. Uma vez que nas tecnologias atuais se encontram definidos requisitos de convivência para que os sinais sejam separados de vários nanómetros e isolados convenientemente, o *crosstalk* devido a XPM torna-se negligenciável quando comparado com o induzido devido a SRS. [36]

Assim, devido ao facto de o efeito de SRS ser o fator crítico em sistemas WDM, pretende-se efetuar um estudo do mesmo, para posteriormente analisar a viabilidade da utilização do espectro disponível na banda C para a utilização da tecnologia TWDM.

Primeiramente é apresentado este efeito não linear e a fórmula teórica utilizada para o cálculo do *crosstalk* induzido pelo mesmo. De seguida, será apresentada a montagem experimental utilizada para o estudo deste efeito, resultados obtidos, e será analisada a dependência do mesmo com a potência, número de canais presentes, espaçamento entre canais, comprimentos de onda e taxa de transmissão dos mesmos.

3.2 Difusão Estimulada de Raman (SRS)

A difusão estimulada de Raman (SRS) é um processo não linear importante que permite tornar as fibras óticas em amplificadores de Raman ou em lasers de Raman sintonizáveis. SRS ocorre em fibras óticas quando uma onda bomba é dispersa pelas moléculas de sílica. Este processo pode ser entendido utilizando o diagrama de níveis de energia apresentado na Figura 3.2.1. Alguns fótons bomba dão a sua energia para criar outros fótons de energia mais reduzida a uma frequência menor. A restante energia é absorvida pelas moléculas de sílica, que acabam num estado vibracional excitado. [37]

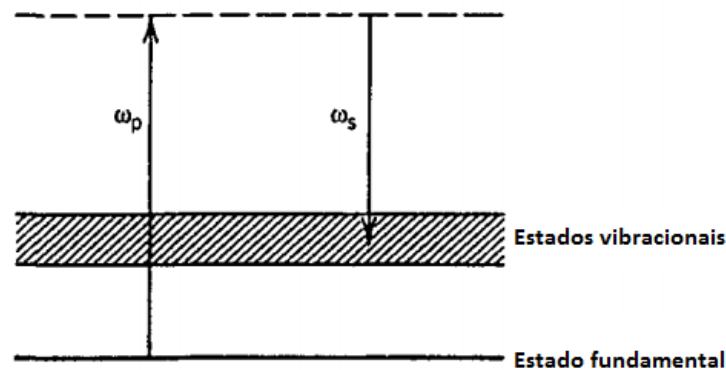


Figura 3.2.1 – Níveis de energia que participam no processo de SRS [37]

Se um sinal Stokes com frequência ω_s e um sinal bomba com frequência ω_p são propagados numa fibra ótica, sendo que $\omega_p > \omega_s$, a energia vai ser transferida do sinal bomba para o sinal Stokes ao longo do comprimento da fibra. Assim, este processo pode também limitar a performance de sistemas multicanal, devido à transferência de potência dos canais de menor comprimento de onda para os canais de maior comprimento de onda (Figura 3.2.2). [33] Assim, à medida que o número de sinais aumenta dentro da banda de ganho de Raman, as interações entre estes tornam-se mais significativas, pelo que para se manter uma situação estável para todos os sinais no recetor, a potência por canal lançada na fibra terá que vir seriamente reduzida com o aumento do número de canais. [38]

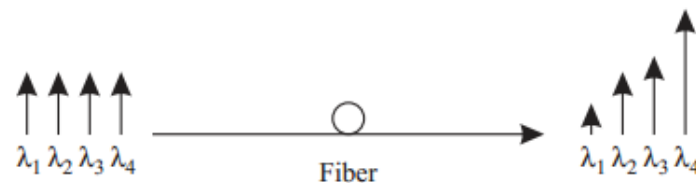


Figura 3.2.2 – O efeito de SRS. A potência de canais de menor comprimento de onda é transferida para os canais de maior comprimento de onda [39]

O crescimento inicial da onda de Stokes é descrito por: [40]

$$dI_S/dz = g_R I_P I_S \quad (3.2.1)$$

onde I_S é a intensidade de Stokes, I_P a intensidade da bomba, e g_R o coeficiente de ganho de Raman que está relacionado com a secção transversal do espalhamento de Raman espontâneo.

O espectro do ganho de Raman $g_R(\Omega)$, onde Ω , que representa a diferença de frequência entre as ondas bomba e Stokes, é a quantidade mais importante para a descrição do processo de SRS. Este parâmetro depende da composição do núcleo da fibra e pode variar significativamente com a utilização de diferentes dopantes. [40]

Na Figura 3.2.3 pode-se verificar o espectro do ganho de Raman para fibras de sílica. A largura de banda e os vários picos presentes neste espectro são devidos à natureza amorfa do vidro. Mais especificamente, os estados de energia vibracional das moléculas de sílica fundem-se para formar uma banda. Como resultado, a frequência de Stokes ω_S pode diferir bastante da frequência do sinal bomba ω_P .

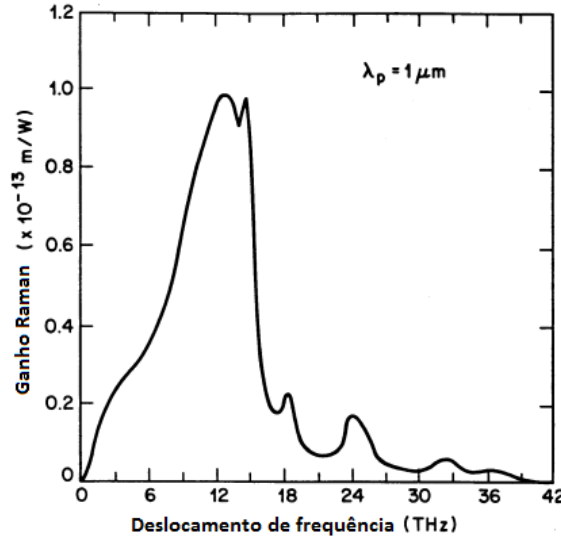


Figura 3.2.3 – Espectro do ganho de Raman para fibras de sílica [37]

O máximo ganho ocorre quando o deslocamento de Raman (Ω) é de cerca de 13THz com um valor aproximadamente igual a $1 \times 10^{-13} \text{ m/W}$. Este valor máximo do ganho de Raman aumenta linearmente com ω_P (ou inversamente com o comprimento de onda bomba λ_P), uma vez que o ganho é proporcional à energia dos fótons bomba, tal como pode ser verificado por:

$$g(\omega) = g_R(\omega) I_P = g_R(\omega) P_P / a_p \quad (3.2.2)$$

onde I_P é a intensidade do sinal bomba, P_P a potência do sinal bomba e a_p a área transversal do feixe bomba na fibra.

O ganho de amplificação obtido numa fibra com comprimento L é dado por:

$$G(\omega) = e^{g(\omega) L} \quad (3.2.3)$$

Por sua vez, a potência de *threshold* (P_{th}), definida como a potência à qual metade da potência da bomba é transferida para o sinal de Stokes na extremidade de saída da fibra ótica de comprimento L , é definida como:

$$P_S(L) = P_P(L) = P_O e^{-\alpha_P L} \quad (3.2.4)$$

3.2.1 Interação com um sinal de bombeio modulado

Um outro processo importante na descrição deste fenómeno não linear envolvendo dois ou mais canais é o efeito de *walk-off*. Este efeito surge devido ao facto de, na presença de dispersão cromática, pulsos a diferentes comprimentos de onda se propagarem a diferentes velocidades na fibra, devido à diferença existente entre as suas velocidades de grupo. A ocorrência deste fenómeno desempenha um importante papel na descrição do efeito de Raman quando um sinal de menor comprimento de onda contendo modulação interage com outro sinal de maior comprimento de onda. [41] Esta interação é devida ao facto de o pulso que se move mais rapidamente ultrapassar o pulso mais lento. Quando tal acontece, além de uma transferência de potência ótica, parte da modulação contida no sinal de menor comprimento de onda é copiada para o sinal de maior comprimento de onda, resultando numa degradação deste último. [42]

Desta forma, pode subdividir-se o efeito de Raman em duas componentes:

- **Estática:** Relacionada com a transferência de potência ótica
- **Dinâmica:** Relacionada com a transferência de conteúdo de modulação

De modo a se perceber melhor este efeito, considere-se o sistema apresentado na Figura 3.2.4, constituído por dois comprimentos de onda λ_p e λ_s , onde $\lambda_p < \lambda_s$. O triângulo representado na figura retrata a aproximação do coeficiente de ganho de Raman em função da separação entre os comprimentos de onda ($\lambda_s - \lambda_p$). [35]

Como o sinal λ_s se encontra dentro da banda de ganho de Raman imposta pelo sinal λ_p , sofrerá, devido ao efeito de SRS estático, um incremento da sua potência ótica (ΔP) transferida do sinal de menor comprimento de onda (λ_p).

Por sua vez, no que diz respeito ao efeito de SRS dinâmico, considerem-se as envolventes amarelas que encenam a modulação inicial contida nos sinais óticos e a reta vermelha que descreve o aumento da dispersão cromática com o aumento do comprimento de onda.

Uma vez que maiores comprimentos de onda representam maior dispersão e menor velocidade de propagação, o sinal λ_p propaga-se a uma velocidade superior que o sinal λ_s , o que leva à ocorrência do efeito de *walk-off*.

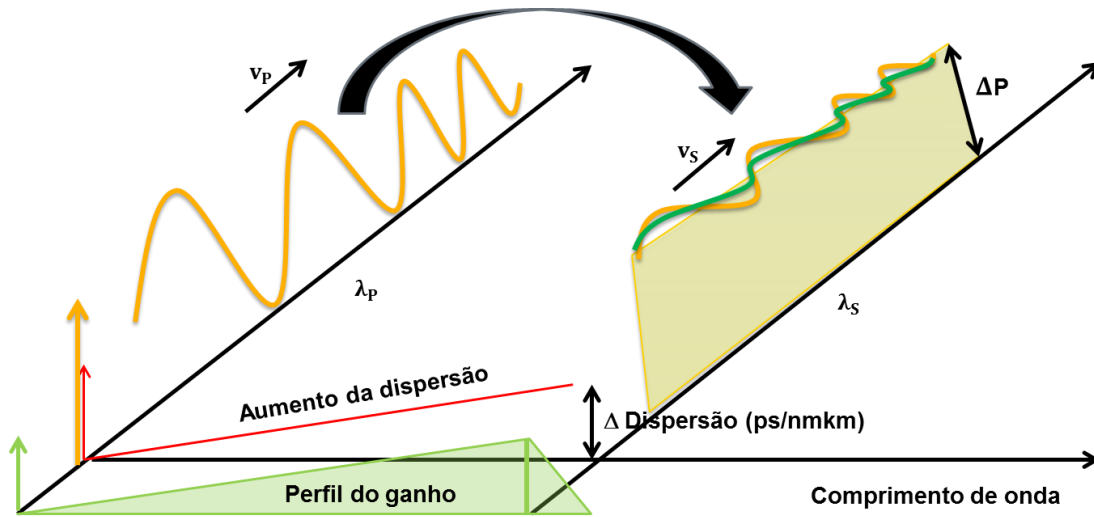


Figura 3.2.4 – Esquema ilustrativo do efeito de SRS sobre dois sinais modulados [43]

Desta forma, à medida que o sinal λ_P vai ultrapassando o sinal λ_S , parte da modulação contida no sinal de menor comprimento de onda é copiada para o sinal de maior comprimento de onda, – envoltório verde na Figura 3.2.4 – que irá resultar numa degradação do sinal λ_S .

3.3 Aproximação Teórica

O CNR de um canal de vídeo afetado pelo *crosstalk* (diafonia) de Raman pode ser estimado a partir da seguinte expressão: [44]

$$CNR = \frac{0.5 m_{CATV}^2 I^2}{B [I_{th}^2 + 2eI + (RIN + RIN_{SRS})I^2]} \quad (3.3.1)$$

onde m_{CATV} é o índice de modulação do vídeo, I a potência ótica recebida, B a largura de banda do canal de vídeo, I_{th} o ruído térmico do recetor, RIN o ruído de intensidade relativo ao laser transmissor e RIN_{SRS} o ruído de intensidade induzido pelo *crosstalk* devido ao efeito de Raman. Se o sinal de dados for um NRZ com PRBS (*Pseudorandom binary sequence*) longo o valor deste último pode ser descrito pela seguinte expressão: [44]

$$RIN_{SRS} = \frac{2}{R_b} \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right)^2 \frac{\sin^2(\pi f / R_b)}{(\pi f / R_b)^2} \cdot Crosstalk_{SRS}(\Omega) \quad (3.3.2)$$

onde ε é a razão de extinção do sinal modulado (NRZ), R_b o seu ritmo de transmissão e $\Omega = 2\pi f$ é a frequência angular do sinal RF.

A aproximação teórica utilizada no âmbito desta dissertação baseia-se essencialmente num estudo efetuado recentemente por Mary R. Phillips e Daniel M. Ott, que provara que a degradação da performance em sistemas de vídeo SCM é introduzida pela dispersão da fibra e pela geração de *crosstalk* devido às suas não linearidades. [35] Nesse estudo encontra-se definido que o *crosstalk* imposto num canal CW (*Continuous Wave*), devido à sua interação com vários canais modulados, é dado como a taxa entre a potência do canal CW após a sua propagação através da fibra e a potência de cada sinal modulado antes da transmissão.

$$Crosstalk(\Omega) \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{\text{Potência RF } (\Omega) \text{ em } \lambda_{CW}}{\text{Potência RF } (\Omega) \text{ em } \lambda_{MOD}} \right) \quad (3.3.3)$$

onde λ_{CW} é o comprimento de onda da CW e λ_{MOD} o comprimento de onda do sinal modulado. [35]

O impacto do efeito do SRS para um sistema de dois canais foi estudado teoricamente em [35], onde se procedeu ao cálculo teórico do *crosstalk* induzido pelo mesmo:

$$Crosstalk_{SRS}(\Omega) = \left(\frac{\rho_{SRS} g_{12} P_{20}}{A_{eff}} \right)^2 \frac{1 + e^{-2\alpha z} - 2 e^{-\alpha z} \cos(\Omega d_{12} z)}{(\alpha^2 + (\Omega d_{12})^2) + \left(1 + \frac{\rho_{SRS} g_{12} P_{20} L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2} \quad (3.3.4)$$

onde z é o comprimento de fibra, A_{eff} a área efetiva da fibra, P_{20} a potência do canal da onda modulada, g_{12} o coeficiente de ganho (perda) de Raman, α a atenuação da fibra, d_{12} o desfasamento da velocidade de grupo dos dois comprimentos de onda, ρ_{SRS} o fator de sobreposição da polarização e L_{eff} o comprimento efetivo de fibra.

O fator g_{12} é positivo se o comprimento de onda do canal 2 é menor que o do canal 1 e negativo caso contrário. Para os cálculos teóricos este valor foi aproximado por um triângulo desde 0 THz até ao pico da curva de ganho de Raman (declive 5.0×10^{-15} m/W/THz) [35]

Por sua vez, o parâmetro d_{12} é dado por:

$$d_{12} = \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \approx D(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (3.3.5)$$

onde D é o coeficiente de dispersão em ps/nm/km e v é a velocidade de grupo de cada canal na fibra. Por fim, o parâmetro L_{eff} é o comprimento efetivo de fibra e é dado por:

$$L_{eff}(z) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha z}) \quad (3.3.6)$$

Desta forma a aproximação teórica utilizada no âmbito desta dissertação foi a seguinte:

$Crosstalk_{SRS} =$

$$\frac{2}{R_b} \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right)^2 \frac{\sin^2(\pi f / R_b)}{(\pi f / R_b)^2} \left(\frac{\rho_{SRS} g_{12} P_{20}}{A_{eff}} \right)^2 \frac{1 + e^{-2\alpha z} - 2 e^{-\alpha z} \cos(\Omega d_{12} z)}{(\alpha^2 + (\Omega d_{12})^2) + \left(1 + \frac{\rho_{SRS} g_{12} P_{20} L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2} \quad (3.3.7)$$

Neste capítulo pretende-se analisar o impacto do efeito do SRS dinâmico para sistemas de um e de quatro canais modulados procedendo-se à variação do espaçamento entre os mesmos, pelo que o modelo anteriormente apresentado não se adequa. Assim, tendo por base (3.3.7) procedeu-se à sua implementação em Matlab e através do ajuste dos parâmetros utilizados no sistema chegou-se a conclusão que para um sistema com N canais, o impacto do efeito do SRS (em dB), é dado pela soma

da contribuição individual de cada canal modulado com a densidade espectral de potência do ruído $PSD_{ruído}$. Esta última foi obtida experimentalmente através da emissão do CW correspondente aos canais modulados isoladamente na fibra e obtenção do espectro correspondente através da utilização de um analisador de espectros RF. [43]

$$Crosstalk_{SRS} (dB) = 10 \log(\sum_{i=1}^N (Crosstalk_{SRS})_i + PSD_{ruído}) \quad (3.3.8)$$

3.4 Montagem experimental

De modo a analisar o impacto do efeito de SRS e verificar a viabilidade da aproximação teórica utilizada foram efetuadas as montagens experimentais apresentadas nas figuras 3.4.1 e 3.4.2.

Na primeira montagem experimental teve-se como objetivo a observação do *crosstalk* imposto num canal CW devido à sua interação com um canal modulado. Neste sistema, foi utilizado um laser sintonizável ECL (*External Cavity Laser*). O laser foi modulado por um MZM (*Mach-Zehnder Modulator*) a duas taxas de transmissão distintas – 2.5Gbps e 10Gbps – através da utilização de um gerador de pulsos com $2^{23} - 1$ PRBS codificada em NRZ. Este sinal foi amplificado através da utilização de um EDFA e através da utilização de um controlador de polarização (PC - *Polarization Controller*) foi possível efetuar o controlo da potência para o valor pretendido. Por sua vez, o comprimento de onda de trabalho do mesmo foi variado para que fosse verificada a variação do *crosstalk* imposto no canal CW.

Para o canal CW foi utilizado o comprimento de onda de 1549.32nm, devido ao facto de este comprimento de onda se encontrar próximo do definido para a para a distribuição de vídeo RF. Estes dois sinais foram então acoplados através de um OADM para o canal de 1549.32nm e foram transmitidos ao longo de 20Km de fibra SMF. Por fim, através da utilização de outro OADM foi filtrado o canal correspondente ao canal CW. Para a receção foi utilizado um fotodiodo PIN, o qual se ligou a um analisador de espectros RF por forma a se verificar o *crosstalk* imposto no canal CW devido à sua interação com o canal NRZ.

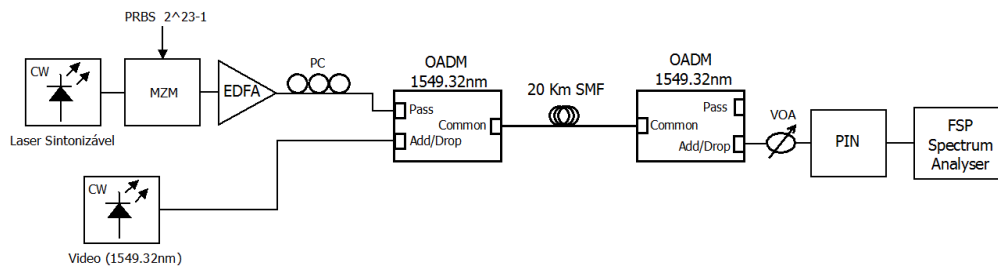


Figura 3.4.1 – Montagem experimental utilizada para teste do *crosstalk* imposto num canal CW devido à sua interação com um canal NRZ

Foi também efetuada a montagem experimental apresentada na Figura 3.4.2 por forma a verificar-se a variação do *crosstalk* imposto no canal CW na presença de quatro canais NRZ. Em relação à montagem anterior, foram utilizados quatro lasers sintonizáveis ECL, cujos comprimentos de onda foram definidos consoante o

pretendido. Tal como no caso anterior, foram efetuadas medidas para duas taxas de transmissão distintas, várias potências dos sinais modulados, bem como para vários comprimentos de onda. Além disso, de modo a se verificar a influência do espaçamento entre canais modulados no *crosstalk* imposto no canal CW foi utilizado um espaçamento entre portadoras óticas de 50, 100 e 200 GHz.

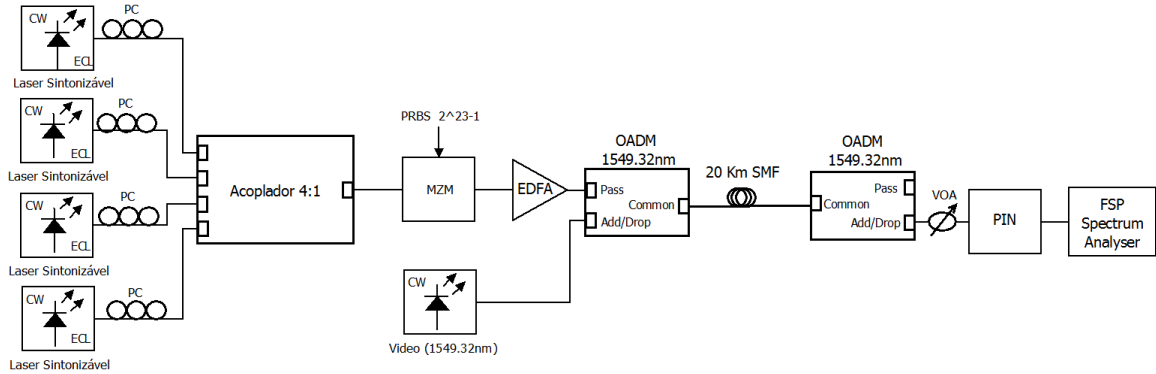


Figura 3.4.2 – Montagem experimental utilizada para teste do *crosstalk* imposto num canal CW devido à sua interação com quatro canais NRZ espaçados de 50, 100 e 200 GHz

De notar, que o teste deste efeito poderia também ser efetuado através da utilização de portadoras elétricas geradas a partir de um RF *signal generator*, que por sua vez modulariam um laser. Assim seria possível verificar o *crosstalk* imposto ao canal CW após a sua propagação ao longo da fibra.

3.5 Resultados obtidos

Neste subcapítulo pretende-se efetuar a apresentação dos resultados obtidos teoricamente e experimentalmente, para que posteriormente seja analisada tanto a viabilidade do modelo teórico utilizado, bem como analisada a variação do *crosstalk* induzido no canal de CW em relação ao número de canais modulados presentes, potência, espaçamento entre os mesmos, bem como comprimentos de onda e taxa de transmissão utilizada.

Para tentar validar os resultados obtidos, foram realizados para todos os casos, estimativas teóricas do *crosstalk*, tendo-se utilizado para o efeito a função transferência descrita na expressão (3.3.8). Os valores dos parâmetros utilizados encontram-se apresentados na Tabela 3.5.1.

Parâmetro	Valor
Fator de sobreposição da polarização (ρ)	0.5
Área efetiva da fibra (A_{eff})	$80 \mu m^2$
Comprimento de fibra (z)	20 Km
Declive do coeficiente de ganho (perda) de Raman	$5 \times 10^{-15} m/W/THz$
Atenuação da fibra (α)	0.2 dB/Km
Coeficiente de Dispersão (D)	17 ps/nm/km

Tabela 3.5.1 – Lista de parâmetros utilizada na determinação dos valores teóricos do *crosstalk*

Na Figura 3.5.1 é possível analisar a variação do *crosstalk* induzido no canal CW em relação à potência do canal modulado. Devido ao facto de o maior *crosstalk* se

verificar para a maior potência utilizada (16dBm), esta potência foi a selecionada para os restantes testes. Desta forma, foi possível verificar de forma notória as alterações em relação às variáveis que se pretendia estudar.

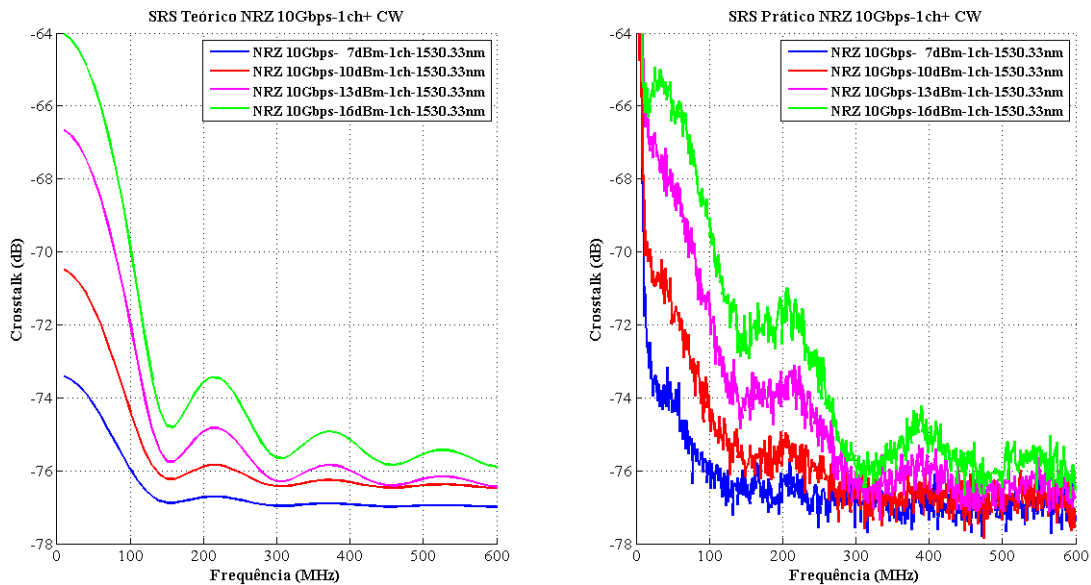


Figura 3.5.1 – Crosstalk induzido por SRS para várias potências de um canal NRZ a 10Gbps

Na Figura 3.5.2 é possível analisar a variação do *crosstalk* induzido no canal CW para um canal NRZ a 2.5 Gbps em relação ao comprimento de onda do canal modulado. Através da análise da mesma figura é possível concluir que quanto maior a separação entre o canal modulado e o canal CW, maior o *crosstalk* induzido no canal CW.

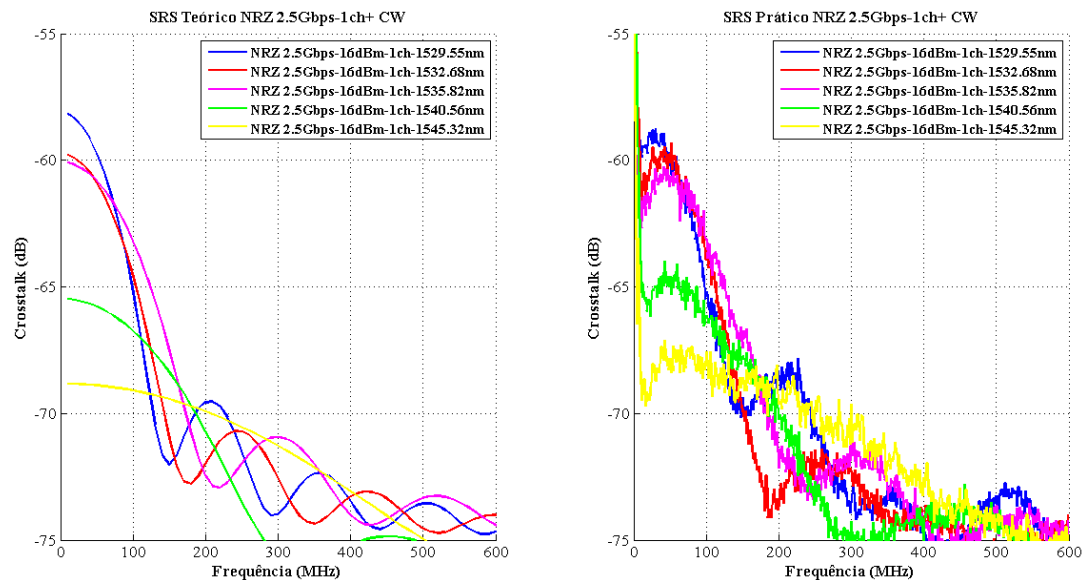


Figura 3.5.2 – Crosstalk induzido por SRS na gama de frequências CATV para um canal NRZ a 2.5Gbps

Através da análise das figuras 3.5.2 e 3.5.3, e sua comparação, é possível verificar um aumento do *crosstalk* induzido no canal CW com o aumento do número de canais modulados. Além disso, é possível verificar novamente, através da análise da Figura 3.5.3, que quanto maior a separação entre o canal CW e canais modulados, maior o *crosstalk* induzido no canal CW. Pode-se verificar também a veracidade destas conclusões, através da análise dos restantes resultados obtidos.

Por sua vez, analisando os resultados obtidos e apresentados nas figuras 3.5.3, 3.5.4 e 3.5.5 é possível retirar conclusões relativamente à dependência do *crosstalk* induzido no canal CW em relação ao espaçamento entre canais modulados. Apesar de a diferença não ser muito significativa, pode-se verificar que quanto maior o espaçamento entre canais modulados, menor o *crosstalk* induzido no canal CW. As mesmas conclusões podem ser retiradas através da análise das figuras 3.5.7, 3.5.8 e 3.5.9.

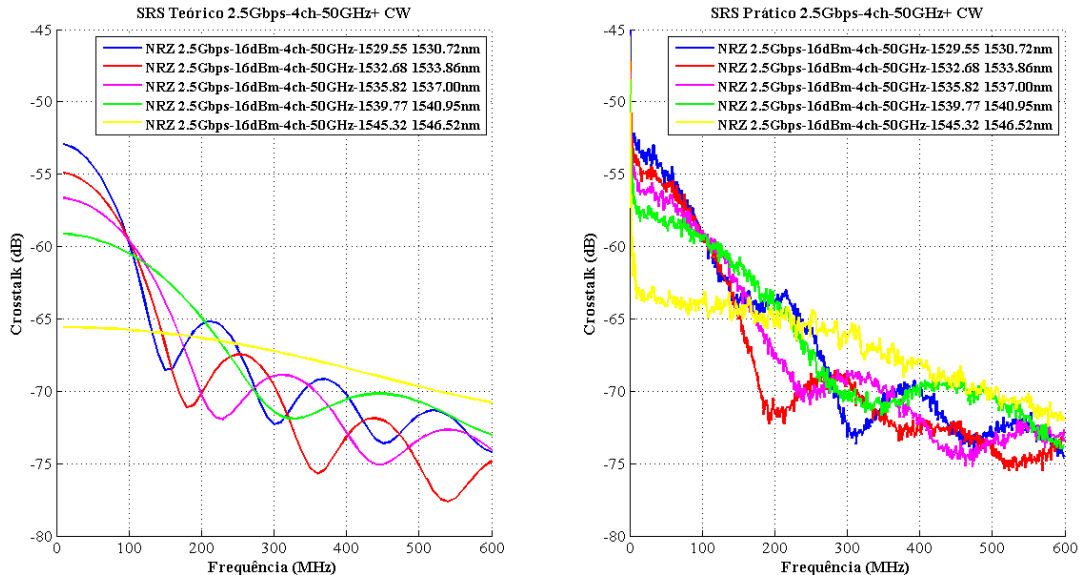


Figura 3.5.3 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 2.5Gbps espaçados de 50GHz

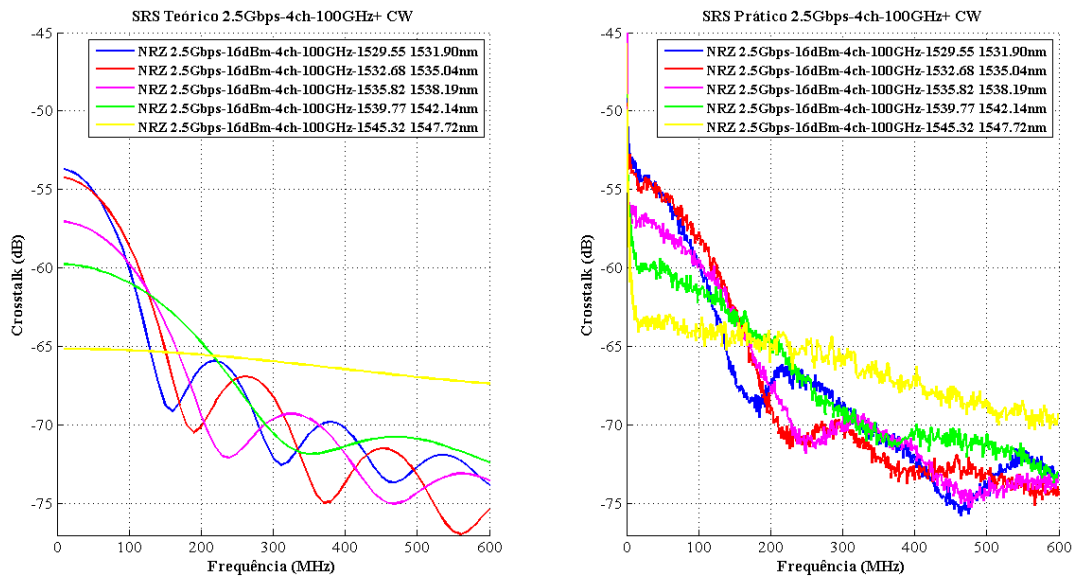


Figura 3.5.4 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 2.5Gbps espaçados de 100GHz

Por fim, através da análise da Figura 3.5.6 e comparação da mesma com a Figura 3.5.1 é possível retirar conclusões relativamente à dependência do *crosstalk* induzido no canal CW em relação à taxa de transmissão dos canais modulados. Pode-se verificar que quanto maior a taxa de transmissão, menor o *crosstalk* induzido no canal CW. O mesmo se pode verificar através da comparação dos resultados apresentados nas figuras 3.5.3, 3.5.4 e 3.5.5 com os resultados apresentados nas figuras 3.5.7, 3.5.8 e 3.5.9, respetivamente.

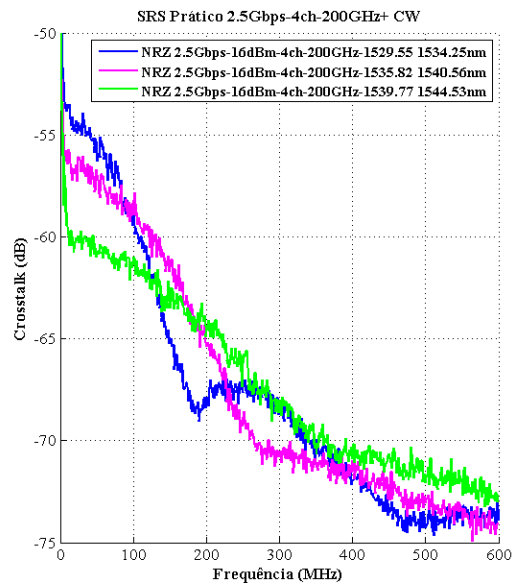
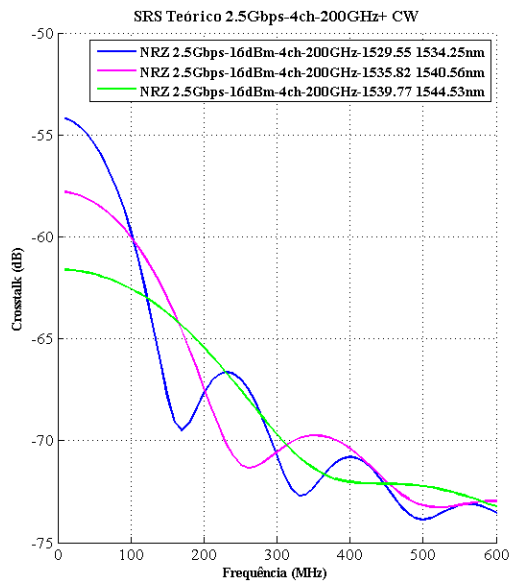


Figura 3.5.5 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 2.5Gbps espaçados de 200GHz

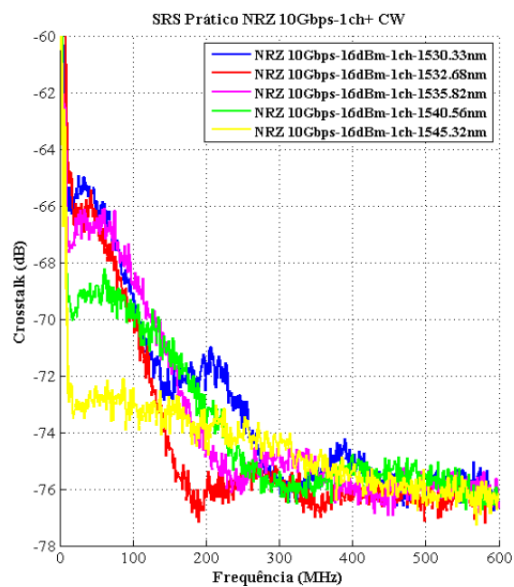
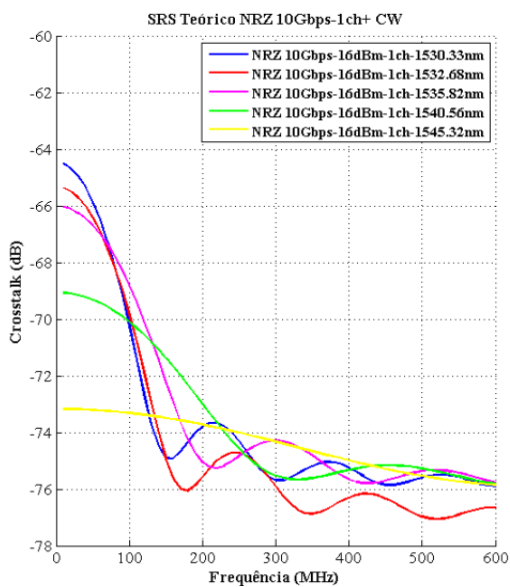


Figura 3.5.6 – Crosstalk induzido por SRS na gama de frequências CATV para um canal NRZ a 10Gbps

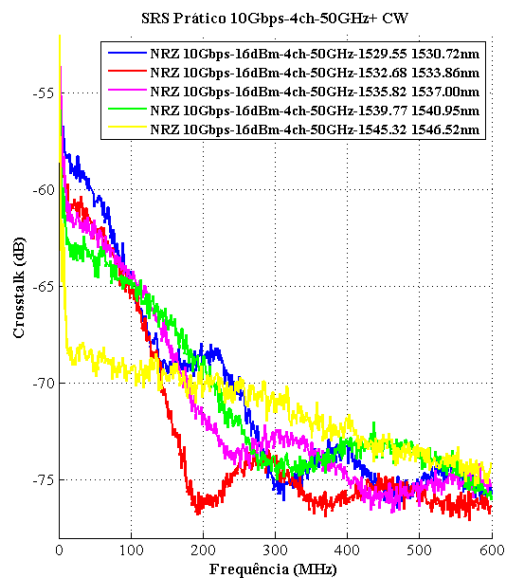
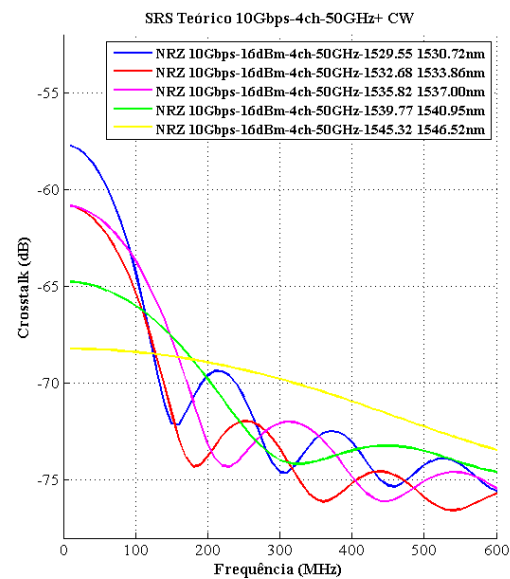


Figura 3.5.7 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 10Gbps espaçados de 50GHz

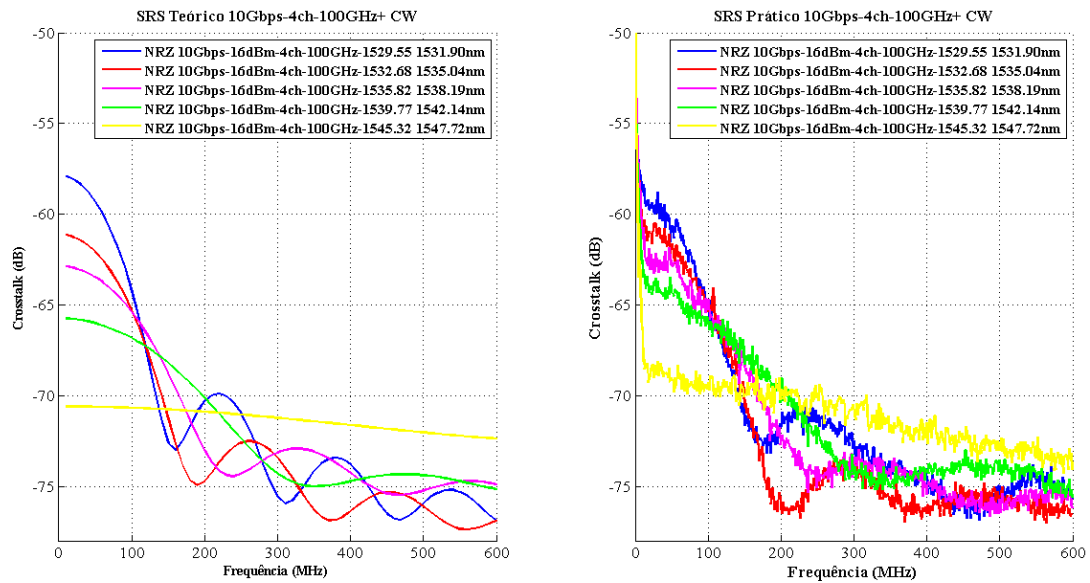


Figura 3.5.8 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ a 10Gbps espaçados de 100GHz

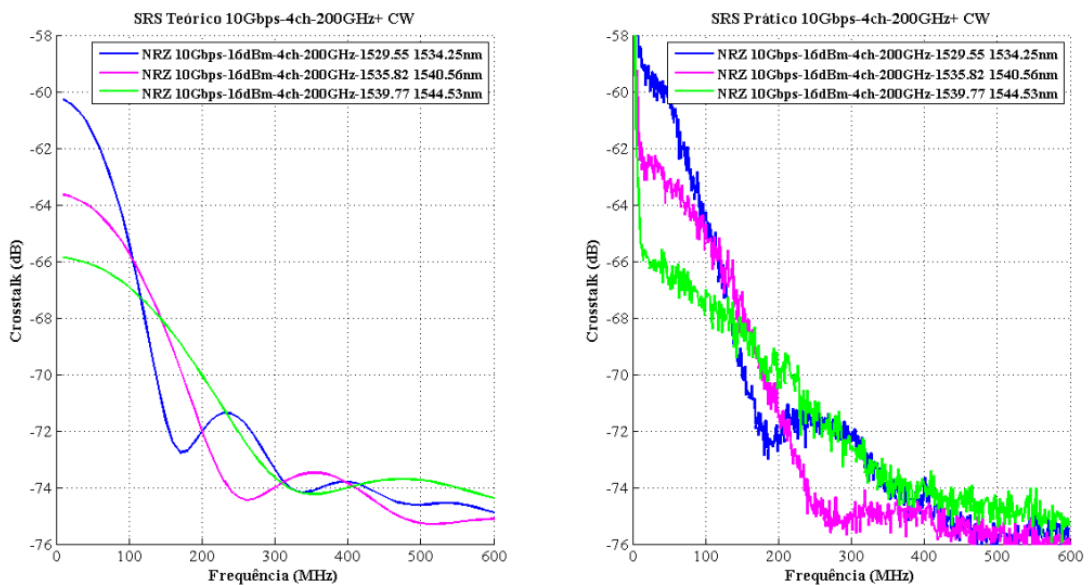


Figura 3.5.9 – Crosstalk induzido por SRS para quatro canais NRZ espaçados a 10Gbps de 200GHz

3.6 Conclusões

Através da observação dos resultados obtidos é possível concluir que o modelo teórico utilizado é bastante viável, uma vez que na maioria dos casos os resultados obtidos experimentalmente se assemelham aos obtidos teoricamente.

Relativamente à contribuição para o *crosstalk* induzido no canal CW devido ao efeito de Raman, é possível através dos resultados obtidos retirar algumas conclusões relativamente às dependências deste efeito:

- **Potência do canal modulado:** Quanto mais elevada for a potência do canal modulado, maior o *crosstalk* induzido no canal CW;
- **Separação entre canal/canais modulado(s) e canal CW:** Quanto maior a separação entre os canais modulados e o canal CW, maior o *crosstalk* induzido no canal CW. Esta conclusão prende-se com o facto de apenas terem sido utilizadas separações de 1.98nm a 20.16nm, correspondentes a uma separação de 0.2473THz e 2.5184THz, respetivamente. Através da análise da Figura 3.2.3 é possível verificar o aumento da influência devida a SRS, o qual se verificou experimentalmente. Pode-se verificar também que quanto maior a separação entre estes, maior o confinamento do *crosstalk* induzido nas baixas frequências. Com a diminuição da separação verifica-se um alargamento do *crosstalk* induzido para frequências superiores, apesar de com menor valor.
- **Número de canais modulados presentes:** Com a presença dos quatro canais modulados verifica-se um aumento do *crosstalk* induzido no canal CW;
- **Espaçamento entre os canais modulados:** Quando maior o espaçamento entre os canais modulados, menor o *crosstalk* induzido no canal CW.
- **Taxa de transmissão dos canais modulados:** Quanto mais elevada a taxa de transmissão dos canais modulados, menor o *crosstalk* induzido no canal CW.

Dadas as semelhanças entre as taxas de transmissão utilizadas, número de canais e a banda de comprimentos de onda onde foram efetuados os testes experimentais (gama disponível da banda C), é possível verificar o efeito que a presença da tecnologia TWDM trará para o caso de coexistência com vídeo. A utilização desta banda tem características óticas atrativas uma vez que permite a amplificação dos sinais através da utilização de EDFAs. Além disso, a atenuação nesta gama de comprimentos de onda é bastante baixa.

Por sua vez, no sentido *upstream*, o tráfego gerado pelo IXIA é introduzido nas ONUs que por sua vez o direcionam para a OLT através da ODN. Por fim, a OLT envia o tráfego para o IXIA de modo a que este receba os pacotes e os compare com os enviados.

Além das ligações físicas, para que a OLT e as ONUs sejam capazes de efetuar a transmissão de tráfego, é necessário configurar todas as portas e o modelo de tráfego através do *software IxNetwork*. Os resultados das transmissões dos pacotes são apresentados na forma de estatísticas no *software IxNetwork*, onde se podem destacar as seguintes:

- **Frames sent** – Número total de pacotes enviados
- **Valid Frames Received** – Número total de pacotes válidos recebidos
- **Packet Error Rate (PER)** – Taxa de erros de pacotes

Com estes resultados estatísticos estamos em condições de analisar o desempenho do sistema. Esta análise estatística é baseada na taxa de erros de pacotes, PER, sendo dada pela equação seguinte:

$$PER = 1 - \frac{\text{Valid Frames Received}}{\text{Frames sent}} \quad (4.1.1)$$

Através da equação (4.1.1), pode-se verificar que o PER corresponde a uma relação entre o número total de pacotes válidos recebidos e o número total de pacotes enviados. Assim, o valor ótimo da taxa de erros de pacotes é zero, que corresponde ao caso em que todos os pacotes enviados foram corretamente recebidos.

4.1.1 Caracterização de sistema EPON

Os equipamentos utilizados para a caracterização do sistema EPON foram a OLT-AN5116-02 e ONU-AN5006-074, fabricados pela empresa *FiberHome*, cujas características se encontram apresentadas nas tabelas 4.1.1 e 4.1.2, respetivamente.

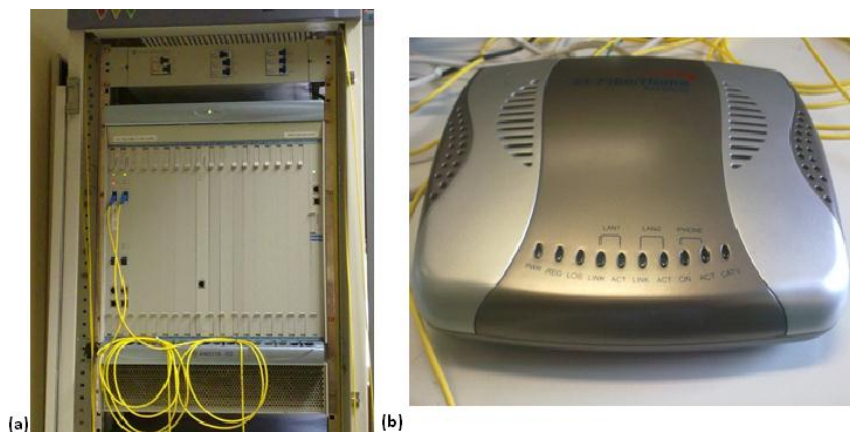


Figura 4.1.2 – (a) OLT EPON (OLT-AN5116-02)

(b) ONU EPON (ONU-AN5066-074)

Fabricante	FiberHome
Modelo	AN5116-02
Comprimento de onda de transmissão	1490 nm
Comprimento de onda de receção	1310 nm
Potência transmitida (norma)	+2 a +7 dBm
Potência transmitida (medida)	+3 a +5 dBm
Potência máxima receção	-6 dBm
Sensibilidade do recetor (<i>norma</i>)	-27 dBm
Taxa de transmissão	1.25 Gbps
Taxa de receção	1.25 Gbps
Tipo do conector	SC-PC
Fonte de alimentação	DC -48V
Temperatura de funcionamento	0°C a 45°C

Tabela 4.1.1 - Características OLT EPON

Fabricante	FiberHome
Modelo	AN5006-05
Comprimento de onda de transmissão	1310 nm
Comprimento de onda de receção	1490±10 nm
Potência transmitida (<i>norma</i>)	-1 a +4 dBm
Potência máxima receção	-3 dBm
Sensibilidade do recetor (<i>norma</i>)	-24 dBm
Sensibilidade do recetor (medida)	-28 dBm
Taxa de transmissão	1.25 Gbps
Taxa de receção	1.25 Gbps
Tipo do conector	SC-PC/SC-APC
Fonte de alimentação	DC +12V
Temperatura de funcionamento	-10°C a 45°C

Tabela 4.1.2 – Características ONU EPON

4.1.1.1 Taxa de Linha Máxima das ONUs

De modo a caracterizar as ONUs do sistema EPON e a garantir que o tráfego é enviado a uma velocidade que não introduz qualquer perda de pacotes, é essencial testar a taxa máxima efetiva que as ONUs deste sistema toleram. Este teste é efetuado por forma a investigar se é possível atribuir a taxa máxima de linha permitida para a porta Ethernet das ONUs (100 Mbps).

Este teste não é efetuado para a OLT uma vez que não é possível atingir a máxima velocidade da OLT, 1.25 Gbps, devido ao facto de apenas existirem seis ONUs no laboratório. Desta forma, a máxima velocidade que pode ser testada no laboratório é de 600 Mbps, correspondente à utilização das seis ONUs operando cada uma delas à máxima velocidade suportada pelas suas portas Ethernet (100 Mbps).

Para a realização desta experiência foi efetuada a montagem experimental apresentada na Figura 4.1.3. No ODN foi utilizado um VOA (*Variable Optical Attenuator*) de modo a emular vários *power budgets*, 20 Km de fibra de modo a ser introduzida alguma dispersão e ainda um splitter de 1:8 por forma a dividir a potência pelas duas ONUs utilizadas nesta experiência. Além disso foram utilizados dois

triplexers para separar e juntar os comprimentos de onda *upstream* e *downstream*, de modo a variar a atenuação apenas no comprimento de onda em análise.

Antes da realização da experiência foram ainda caracterizados os *triplexers* (Tabela 4.1.3) e medidas as perdas da fibra e *splitter*.

Parâmetro	Unidades	Valor
Banda de Passagem @1490nm	nm	1435 a 1510
Banda de Passagem @1310nm	nm	< 1430
Banda de Passagem @1550nm	nm	> 1515
Perdas por inserção @1490nm	dB	0.63
Perdas por inserção @1310nm	dB	0.75
Perdas por inserção @1550nm	dB	0.88
Isolamento @1490nm	dB	≥ 30
Isolamento @1310nm	dB	≥ 20
Isolamento @1550nm	dB	≥ 15
Perdas por retorno	dB	≥ 50
Temperatura de funcionamento	°C	-40 a +85

Tabela 4.1.3 – Características do *triplexer*

O *splitter* de 1:8 introduz cerca de 10 dB de perdas e os 20 Km de fibra uma atenuação de cerca de 7dB @1300nm, 5dB @1490nm e 4dB @1550nm.

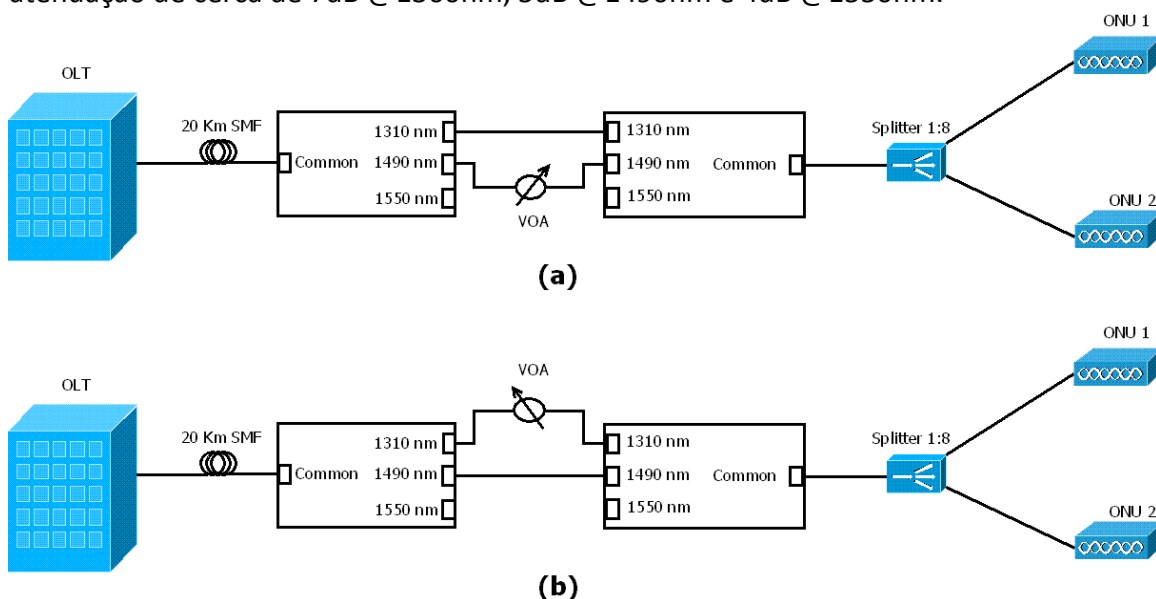


Figura 4.1.3 – Montagem experimental para teste da velocidade máxima das ONUs (a) *Downstream* (b) *Upstream*

Apesar de o tráfego introduzido ser unidirecional e de se testar cada sentido individualmente, é necessário manter as ligações entre a OLT e as ONUs em ambos os sentidos para que as ONUs efetuem o seu registo no sistema.

Este teste experimental foi executado para vários *power budgets* de *downstream* e *upstream*. Para a medição do *power budget* de *downstream* procedeu-se à medição da potência ótica à saída da OLT e à saída do *splitter* ótico, através da utilização de um *power meter*. De seguida calculou-se a diferença entre ambas as potências. Devido à natureza de transmissão das ONUs, no sentido *upstream*, – transmissão em rajada (*burst*) – não é possível medir a potência média com o auxílio

de um *power meter* uma vez que a sua potência média é muito pequena devido ao facto de os pacotes enviados pela ONU ocuparem um espaço de tempo muito curto na trama *upstream*. Assim, de modo a se conseguir calcular o *power budget* de *upstream*, utilizou-se um laser auxiliar emitindo a 1310 nm e mediu-se a potência de emissão do laser e de chegada à OLT. Por fim, foram transmitidos um milhão de pacotes e foi obtido o valor do PER.

Nas figuras 4.1.4 e 4.1.5 pode-se verificar a variação do PER para diferentes taxas de linha e para diferentes *power budgets* de *downstream* e *upstream*. Uma vez que os resultados obtidos para as duas ONUs eram bastante semelhantes e por forma a simplificar a apresentação dos mesmos, optou-se pelo cálculo da média dos resultados do PER obtidos e pela apresentação da mesma.

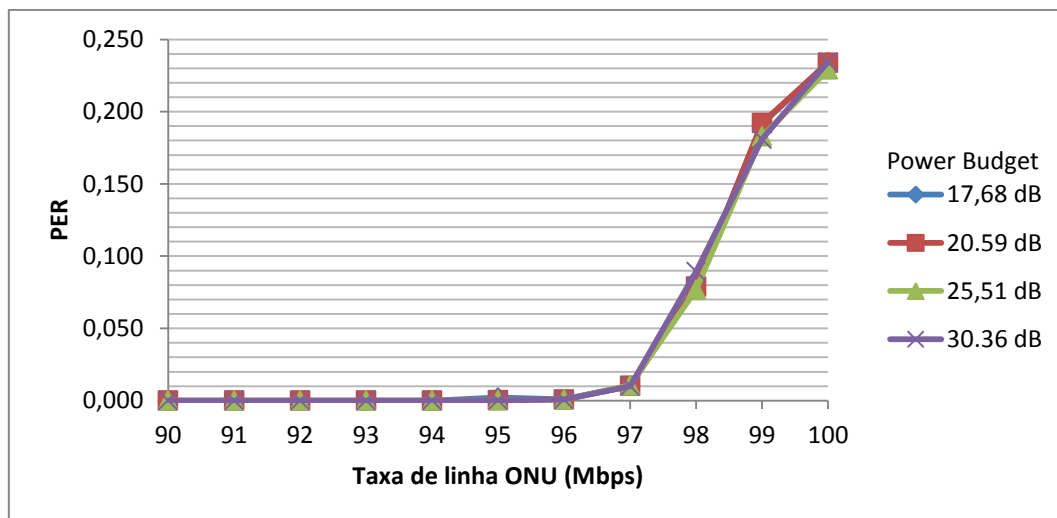


Figura 4.1.4 – PER em função da taxa de linha para diferentes *power budgets* - Sentido *downstream*

Para o *downstream*, é possível observar que até 92 Mbps a transmissão é efetuada sem qualquer perda de pacotes. Após este valor, verifica-se a existência de perda de pacotes e um aumento da mesma com o aumento da taxa de linha das ONUs. De notar, que a taxa de linha máxima é de 100 Mbps devido a limitações impostas pelas portas *Ethernet* das ONUs.

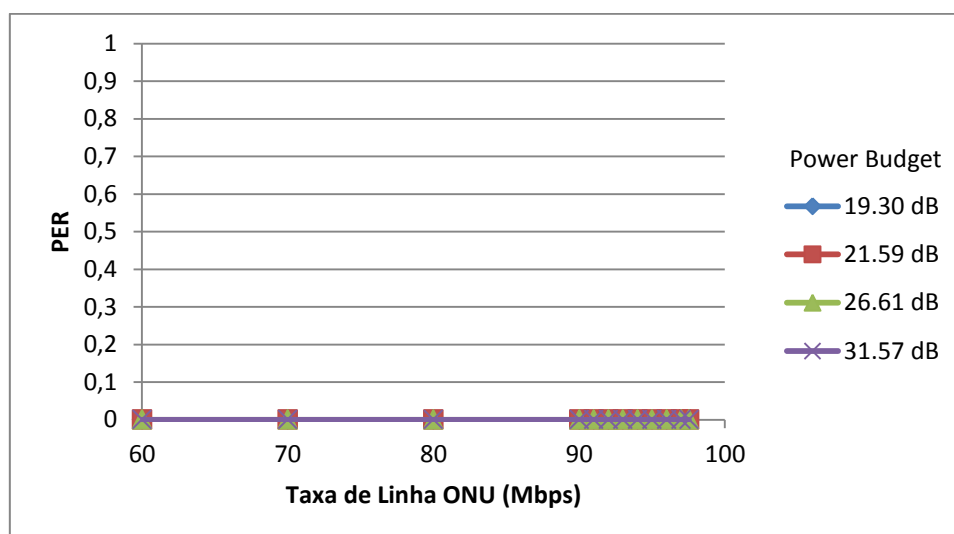


Figura 4.1.5 – PER em função da taxa de linha para diferentes *power budgets* - Sentido *upstream*

Por sua vez, através dos resultados obtidos para o *upstream* é possível verificar que o PER é sempre zero independentemente da taxa de linha da ONU. Neste caso, devido às limitações impostas pelas portas *Ethernet* das ONUs, a taxa de linha máxima é limitada pelo gerador de tráfego a 97.53 Mbps.

Analisando os resultados de ambos os sentidos de transmissão em conjunto é possível concluir que para que uma transmissão seja efetuada sem erros o valor da taxa de linha das ONUs não deve exceder o valor de 92 Mbps. Além disso, é possível também concluir que o valor de PER é independente do *power budget* do sistema.

4.1.1.2 Máximo *Power Budget*

Neste subcapítulo pretende-se caracterizar o sistema EPON disponível no laboratório em termos de máximo *power budget*. Para a realização desta caracterização foi efetuada a montagem da Figura 4.1.6 e foi variada a atenuação imposta pelo VOA por forma a emular diferentes *power budgets*. Por fim, para cada caso, foram transmitidos um milhão de pacotes a uma taxa fixa de 90 Mbps e obtido o PER.

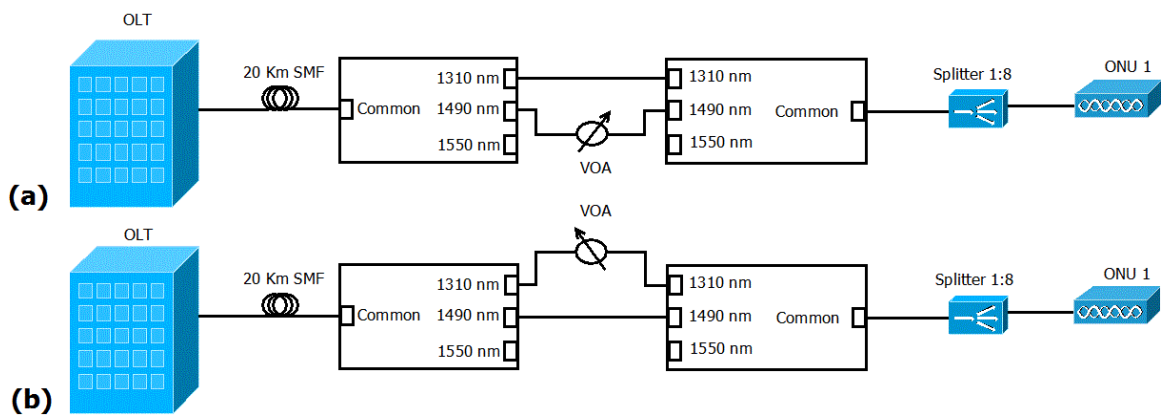


Figura 4.1.6 – Montagem experimental para teste do máximo *power budget*: (a) *Downstream* (b) *Upstream*

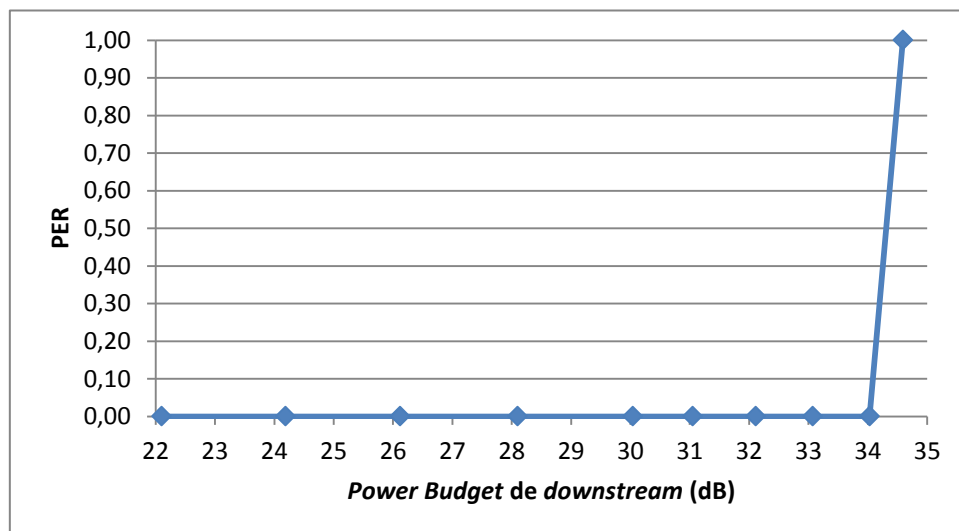


Figura 4.1.7 – PER em função do *power budget* de *downstream*

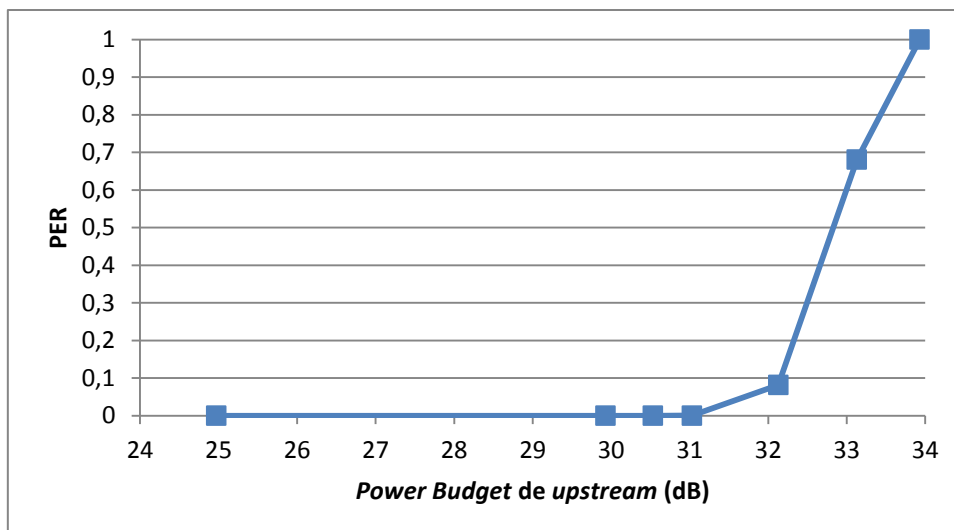


Figura 4.1.8 – PER em função do *power budget* de *upstream*

Através dos resultados experimentais obtidos e apresentados na Figura 4.1.7 é possível concluir que o máximo *power budget* de *downstream* é de 34 dB uma vez que para valores de *power budget* superiores a este, a ONU liga a luz de alarme de perda de sinal (*Loss of Signal*) e deixa de ser capaz de receber pacotes corretamente. Por sua vez, a partir da Figura 4.1.8 é possível verificar que o *power budget* máximo obtido para o sentido *upstream* é de 31 dB. A partir deste valor o PER aumenta com o aumento da atenuação imposta no ODN atingindo o seu valor máximo para um *power budget* de *upstream* de 34 dB. A partir deste valor a ONU acende uma luz de alarme que indica que a ONU não se encontra registada. Isto significa que a ONU recebe o sinal da OLT através do canal de *downstream*, mas não é capaz de se registar no sistema uma vez que a ligação de *upstream* se encontra demasiado degradada.

4.1.1.3 Máximo alcance

Neste subcapítulo pretende-se caracterizar o sistema EPON disponível no laboratório relativamente ao máximo alcance atingível pelo mesmo. Apesar de se encontrar definido na norma EPON um alcance de 20 Km, pretende-se com este teste experimental verificar se se pode ir mais além do definido.

Para tal efetuou-se a montagem experimental apresentada na Figura 4.1.9. Cada *splitter* introduz uma atenuação de aproximadamente 10 dB o que somado com a atenuação imposta pelos 20 Km de fibra SMF ($\approx 5\text{dB @}1490\text{ nm}$), encontra-se distante da máxima atenuação permitida neste sistema. Assim, é possível efetuar a experiência com a certeza de que erros não serão devidos à atenuação do sistema, mas sim devidos à distância de fibra utilizada no mesmo.

O comprimento de fibra foi sucessivamente aumentado através da utilização de rolos de fibra de diversos comprimentos até que o PER atingisse o seu valor máximo. Neste teste, em cada iteração foram enviados um milhão de pacotes a uma taxa fixa de 90 Mbps e obtido o PER.

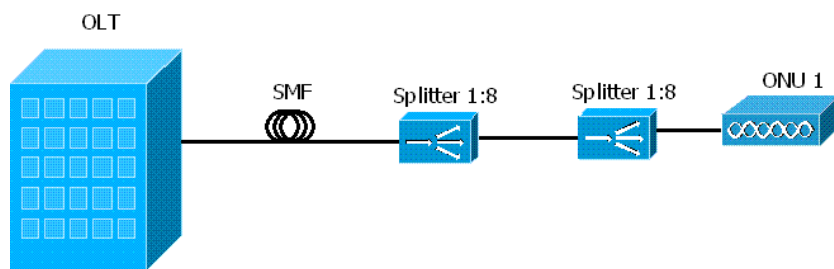


Figura 4.1.9 – Montagem experimental para teste do máximo alcance do sistema EPON

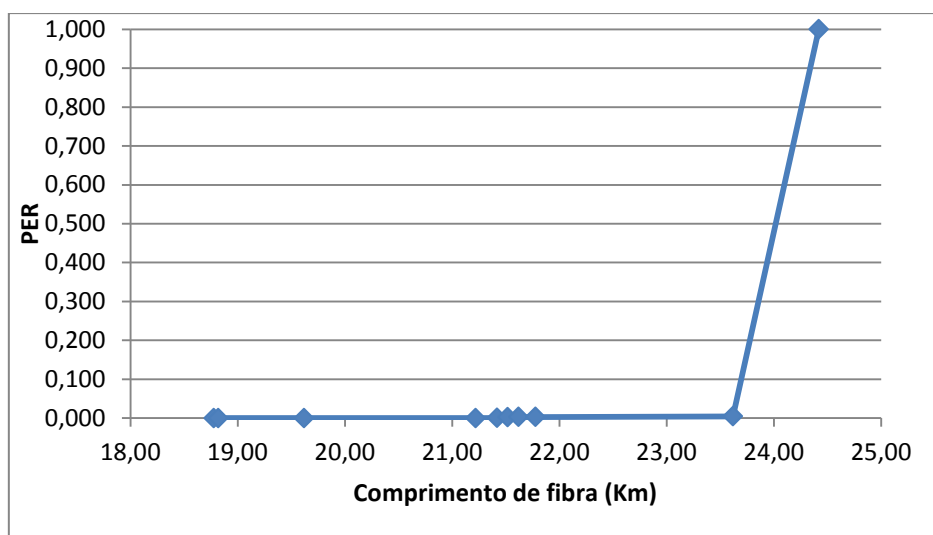


Figura 4.1.10 – PER em função do comprimento de fibra do sistema

Através dos resultados experimentais obtidos é possível concluir que o alcance máximo atingível pelo sistema EPON disponível no laboratório é de 21,2 Km. Desde este valor até ao valor de 23,62 Km uma quantidade muito pequena de pacotes é perdida uma vez que o PER é muito próximo de 0. Para um comprimento de fibra de 24,42 Km todos os pacotes são perdidos. Este limite é imposto devido ao tempo de atraso imposto na transmissão devido ao comprimento de fibra utilizado, que leva a OLT a descartar a transmissão devido ao facto de o RTT (*Round Trip Time*) ser superior ao máximo definido.

4.1.2 Caracterização de sistema G-PON

Os equipamentos utilizados para a caracterização do sistema G-PON foram a OLT7-8CH (Figura 4.1.11) e a ONU PTINONT7RF1GE (Figura 4.1.12), fabricados pela empresa PT Inovação, cujas características se encontram apresentadas nas tabelas 4.1.4 e 4.1.5, respetivamente.



Figura 4.1.11 – OLT GPON (OLT7-8CH)



Figura 4.1.12 – ONUs G-PON (ONT7RF1GE)

Fabricante	PT Inovação
Modelo	OLT7-8CH
Comprimento de onda de transmissão	1490 nm
Comprimento de onda de receção	1310 nm
Potência transmitida (MGPON <i>datasheet</i>)	+5<Pout<+6 dBm
Potência transmitida (medida)	3.6 dBm
Potência máxima receção (MGPON <i>datasheet</i>)	-10 dBm
Sensibilidade do recetor (MGPON <i>datasheet</i>)	-31 dBm
Taxa de transmissão	2.5 Gbps
Taxa de receção	1.25Gbps
Tipo do conector	SC-PC
Fonte de alimentação	DC -48V
Temperatura de funcionamento	-5°C a 50° C

Tabela 4.1.4 – Características OLT G-PON

Fabricante	PT Inovação
Modelo	PTINONT7RF1GE
Comprimento de onda de transmissão	1310 nm
Comprimento de onda de receção	1490 nm
Potência transmitida (MGPON <i>datasheet</i>)	+1 a +6 dBm
Potência máxima receção (MGPON <i>datasheet</i>)	-8 dBm
Sensibilidade do recetor (MGPON <i>datasheet</i>)	-27 dBm
Taxa de transmissão	1.25 Gbps
Taxa de receção	2.5 Gbps
Tipo do conector	SC-APC
Fonte de alimentação	DC +12V
Temperatura de funcionamento	-5 a +85 °C

Tabela 4.1.5 – Características ONU G-PON

4.1.2.1 Taxa de Linha Máxima das ONUs

De modo a caracterizar as ONUs do sistema G-PON e a garantir que o tráfego é enviado a uma velocidade que não introduz qualquer perda de pacotes, é essencial testar a taxa máxima efetiva das ONUs deste sistema.

Tal como mencionado na Tabela 4.1.4 a taxa de transmissão máxima para a receção da OLT é de 1.25 Gbps. Esta taxa de transmissão não é atingível na prática uma vez que apenas existem duas ONUs disponíveis no laboratório. Já para as ONUs, é

expectável que a sua taxa de transmissão máxima seja de 1.25 Gbps e a sua taxa de receção máxima de 2.5 Gbps. No entanto, devido ao facto de se utilizar a carta de 1Gbps do IXIA para gerar o tráfego, não é possível efetuar o teste dessas velocidades de transmissão.

Para a realização do teste da máxima taxa de linha permitida pelas ONUs foram efetuadas montagens semelhantes às apresentadas na Figura 4.1.3. Este teste foi efetuado três vezes, uma com cada uma das ONUs ligada separadamente e outra com as duas ONUs ligadas em simultâneo. Para todos estes testes foram enviados um milhão de pacotes e foi obtido o valor do PER.

O resultado para o teste da máxima taxa de *downstream* com apenas uma ONU ligada ao sistema, encontra-se apresentado na Figura 4.1.13. Uma vez que os resultados obtidos para as duas ONUs foram semelhantes, dispensou-se a representação duplicada dos mesmos.

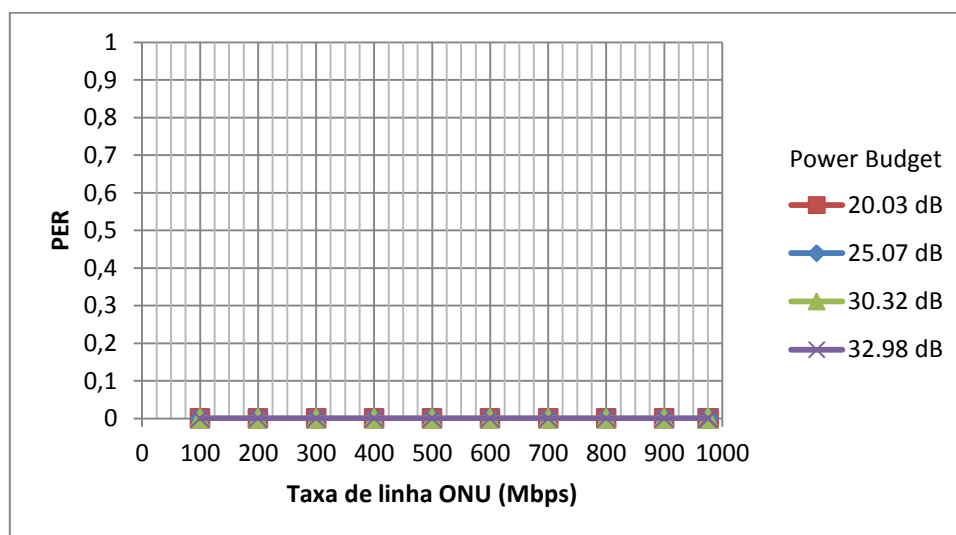


Figura 4.1.13 – PER em função da taxa de linha para diferentes *power budgets* – *Downstream* (Uma ONU)

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que é possível atingir a máxima velocidade permitida pela carta do IXIA (976.02 Gbps) sem que existam perdas de pacotes. Este limite foi imposto pela carta do IXIA de 1 Gbps que gerava uma mensagem de erro no *software IxNetwork* e não permitia ir além desta taxa de transmissão.

De seguida foi efetuado o teste da máxima taxa de *downstream* para duas ONUs ligadas simultaneamente ao sistema. O resultado deste teste encontra-se apresentado na Figura 4.1.14. Mais uma vez, devido à semelhança dos resultados obtidos do PER das duas ONUs para os diferentes *power budgets*, dispensou-se a representação duplicada dos mesmos.

Através dos resultados obtidos é possível verificar que não existem perdas de pacotes para as taxas de linha testadas. No entanto, verificou-se um limite da taxa de linha da ONU de 488.01 Mbps, que corresponde a metade do resultado anteriormente obtido para o caso em que se utilizou apenas uma ONU no sistema G-PON.

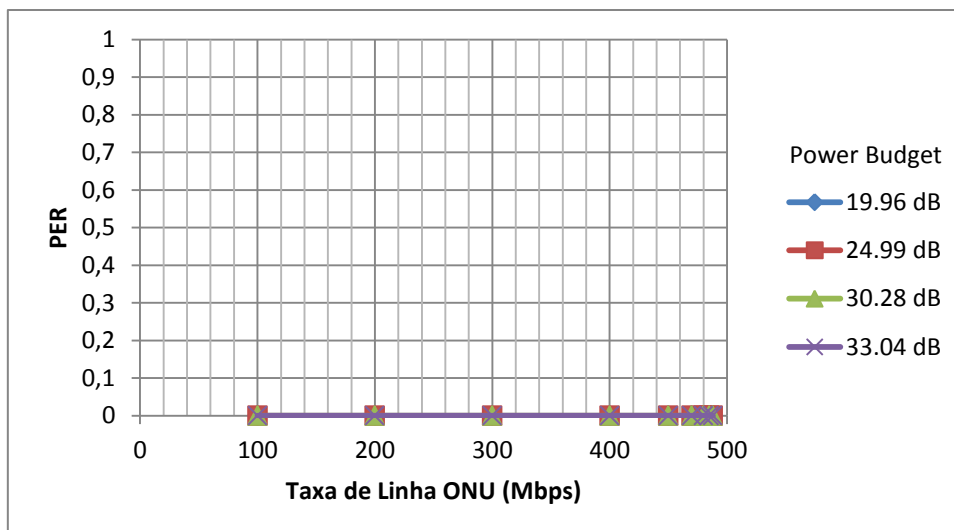


Figura 4.1.14 – PER em função da taxa de linha para diferentes *power budgets* – Downstream (Duas ONU)

Para a transmissão *upstream* foram efetuados os mesmos três testes. Um para cada uma das ONUs ligadas separadamente e outra com as duas ONUs ligadas simultaneamente ao sistema.

Os resultados obtidos para o caso em que as ONUs foram ligadas separadamente encontram-se apresentados na Figura 4.1.15. Para o sentido *upstream* o valor do PER obtido para cada uma das ONUs quando ligadas separadamente é um pouco diferente. Por esse motivo, neste caso, optou-se pela representação conjunta dos dois resultados, por forma a verificar essa mesma diferença.

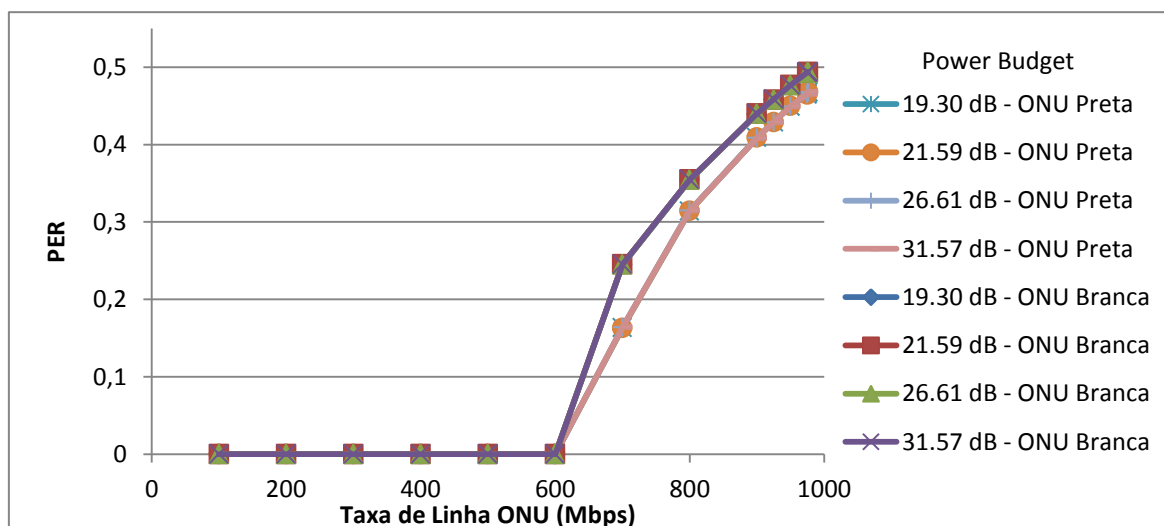


Figura 4.1.15 – PER em função da taxa de linha para diferentes *power budgets* – Upstream (Uma ONU)

Através dos resultados obtidos é possível concluir que ambas as ONUs permitem efetuar a transmissão sem perda de pacotes para taxas de transmissão inferiores a 600 Mbps. Para valores superiores a esse valor verifica-se um aumento do PER com a taxa de linha e um PER superior da ONU Branca em relação ao da ONU Preta.

Para o caso em que as duas ONUs se encontram simultaneamente ligadas ao sistema (Figura 4.1.16) é possível verificar através dos resultados obtidos que não existem perdas de pacotes para as taxas de linha testadas. De notar, que devido às limitações da carta de 1 Gbps apenas se pode efetuar testes até 488.01 Mbps.

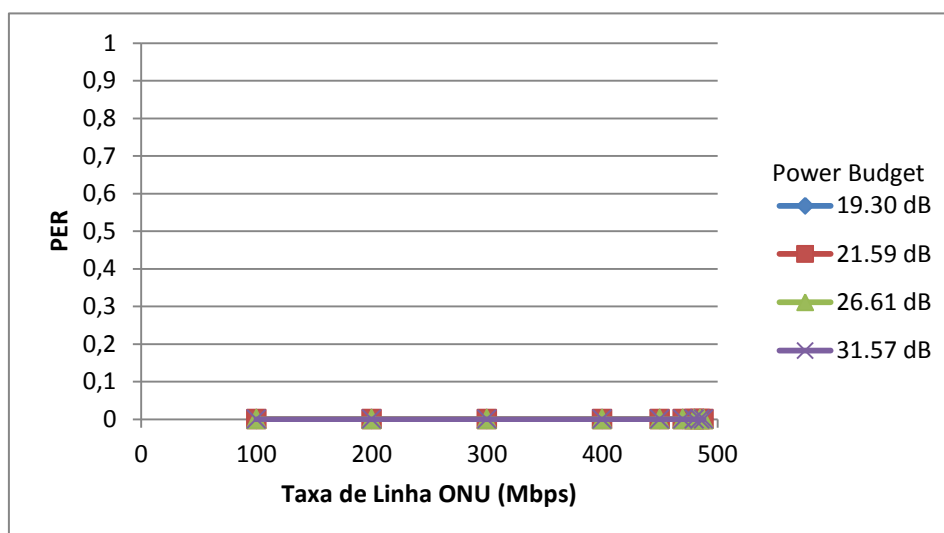


Figura 4.1.16 – PER em função da taxa de linha para diferentes *power budgets* – *Upstream* (Duas ONUs)

Os resultados obtidos para os dois testes efetuados permitem retirar algumas conclusões:

- Dentro dos limites testados, a atenuação não afeta a máxima taxa de linha nem os resultados obtidos para o PER → Desta forma, é possível concluir que os limites impostos à máxima taxa de linha são impostos por limitações de *hardware*.
- Quando se utiliza mais que uma ONU a capacidade disponível é uniformemente distribuída por todas as ONUs. Por exemplo, uma ONU ligada ao sistema recebe 100% da máxima taxa de transmissão da carta de 1Gbps do IXIA (976.02 Gbps). Com duas ONUs, 50% dessa taxa de transmissão é atribuída a cada ONU (488.01 Gbps). Isto permite concluir que, por defeito, a capacidade da carta de 1Gbps do IXIA é uniformemente distribuída pelas ONUs presentes no sistema. De notar que a interface Web da OLT permite criar diferentes perfis para cada cliente.
- Para as taxas de linha e power budgets de *downstream* testados não se verificou qualquer tipo de limitação das ONUs.
- Para o sentido *upstream* verificaram-se limitações para taxas de linha superiores a 600 Mbps. No entanto, não se verificaram limitações devidas aos power budgets de *upstream* testados.

4.1.2.2 Máximo Power Budget

Neste subcapítulo pretende-se caracterizar o sistema G-PON disponível no laboratório em termos de máximo *power budget*. Para a realização desta caracterização foi efetuada a montagem da Figura 4.1.6 e foi variada a atenuação imposta pelo VOA por forma a emular diferentes *power budgets*. No entanto, para este caso, foram utilizadas as duas ONUs disponíveis por forma a investigar se os

resultados obtidos diferem para valores semelhantes de *power budget*. Para cada caso, foram transmitidos um milhão de pacotes a uma taxa fixa de 400 Mbps e obtido o PER.

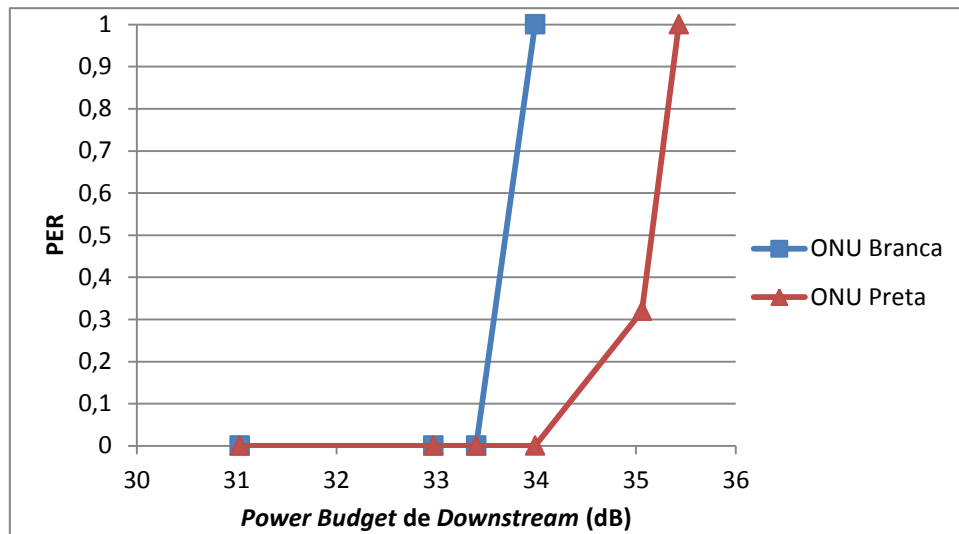


Figura 4.1.17 – PER em função do *power budget* de *downstream* – Duas ONUs

Através dos resultados obtidos e apresentados na Figura 4.1.17 é possível verificar que o máximo *power budget* de *downstream* é de 32,97 dB para a ONU Branca e 33,99 dB para a ONU Preta. Assim, de modo a que seja evitada qualquer perda de pacotes, o *power budget* máximo de *downstream* do sistema é 32,97 dB.

Para o sentido *upstream* o máximo *power budget* obtido foi de 33,47 dB para ambas as ONUs. A partir deste valor, o PER aumenta com o aumento da atenuação imposta no sentido *upstream*, atingindo o seu valor máximo para valores de *power budget* de *upstream* de 33,97 dB para o caso da ONU Branca e 34,47 dB para o caso da ONU Preta.

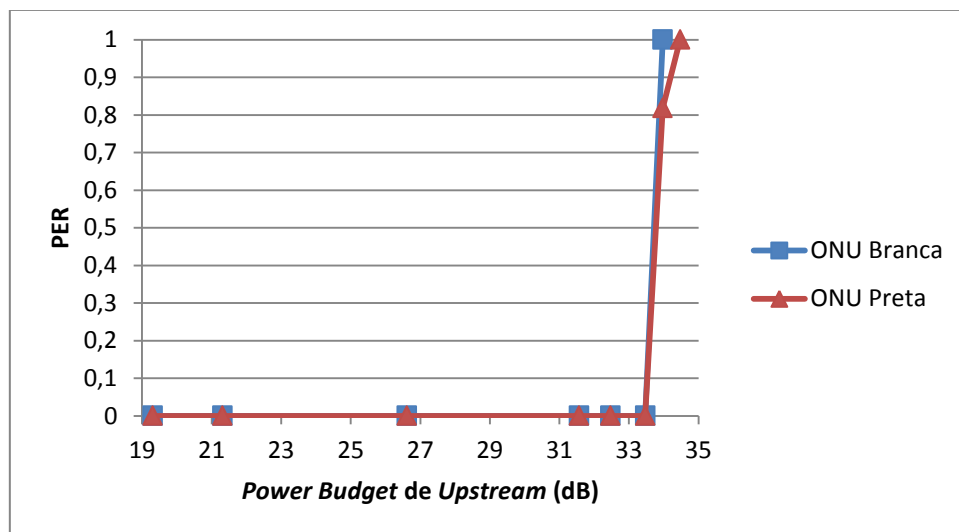


Figura 4.1.18 – PER em função do *power budget* de *upstream* – Duas ONUs

4.1.2.3 Máximo alcance

Neste subcapítulo pretende-se caracterizar o sistema G-PON disponível no laboratório relativamente ao máximo alcance atingível pelo mesmo. Apesar de se encontrar definido na norma G-PON um alcance de 20 Km, pretende-se com este teste experimental verificar se se pode ir mais além do definido.

Para tal efetuou-se uma montagem experimental semelhante à apresentada na Figura 4.1.9, com uma atenuação no ODN de aproximadamente 25 dB, valor que se encontra distante da máxima atenuação permitida neste sistema. Desta forma, é possível efetuar a experiência com a certeza de que erros não serão devidos à atenuação do sistema, mas sim à distância de fibra utilizada no mesmo. O comprimento de fibra foi variado utilizando rolos de fibra de diversos comprimentos. Por fim, para cada iteração foram enviados um milhão de pacotes a 400 Mbps e foi obtido o valor do PER.

Através dos resultados obtidos e apresentados na Figura 4.1.19 é possível concluir que o alcance máximo atingível pelo sistema G-PON disponível no laboratório é de 21,52 Km. De notar que este valor foi obtido com a OLT configurada para uma distância entre 0 e 20 Km. Para comprimentos de fibra superiores todos os pacotes são perdidos uma vez que a ONU não se consegue registar no sistema. Tal como no sistema EPON, este limite é imposto devido ao tempo de atraso imposto na transmissão devido ao comprimento de fibra utilizado, que leva a OLT a descartar a transmissão devido ao facto de o RTT (*Round Trip Time*) ser superior ao máximo definido.

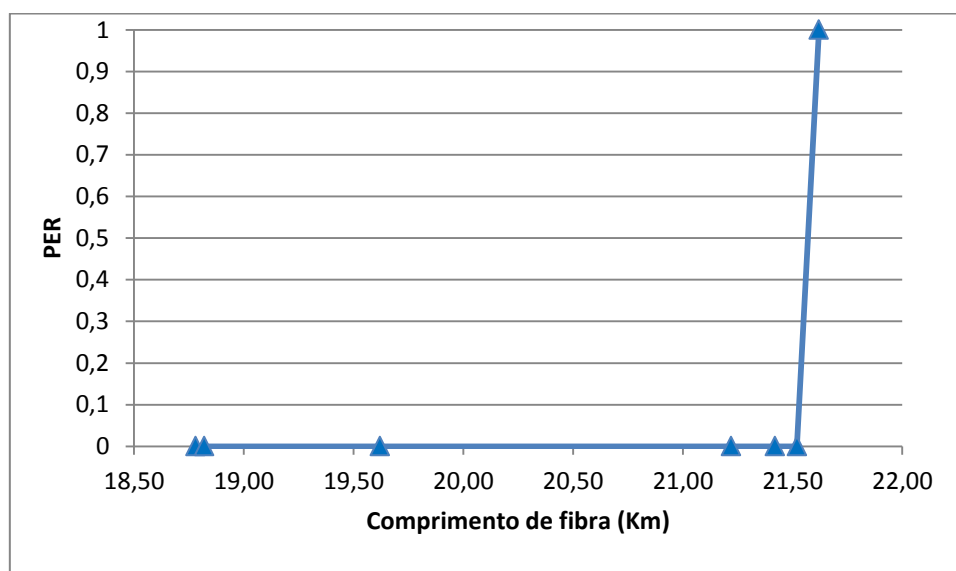


Figura 4.1.19 – PER em função do comprimento de fibra do sistema

4.2 Teste sistema XG-PON

4.2.1 Máximo *Power Budget* de Downstream

O sistema experimental utilizado para testar o sistema XG-PON relativamente ao seu máximo *power budget* de *downstream* encontra-se apresentado na Figura 4.2.1. Neste sistema, foi utilizado um laser sintonizável ECL (*External Cavity Laser*), o qual se sintonizou no comprimento de onda de 1577.03nm. O laser foi modulado por um MZM (*Mach-Zehnder Modulator*) a 10 Gbps através da utilização de um gerador de pulsos com $2^{23} - 1$ PRBS (*Pseudorandom binary sequence*) codificada em NRZ. Este sinal foi transmitido ao longo de 20 Km de fibra SMF de modo a ser introduzida alguma dispersão. Foi utilizado também um VOA de modo a emular vários *power budgets* de *downstream* e um *splitter* de 1:4 por forma a permitir medir a potência ótica à chegada do recetor ótico e a introduzir também algumas perdas adicionais ao sistema. Para a receção foi utilizado um APD (*Avalanche Photodiode*), o qual se ligou a um analisador de diagrama de olho e a um BERT (BER Tester).

Foi utilizada uma potência de saída do CW de 8 dBm, por forma a que o sinal modulado possuísse uma potência de 1.23 dBm, que se aproxima da potência definida como a potência média mínima de um sistema XG-PON da classe N1 (nominal1) – 2dBm [20]. Por fim, através da variação da atenuação imposta pelo VOA, foi obtido o BER em função do *power budget*. Para a medição do *power budget* procedeu-se à medição da potência ótica à saída do MZM e à saída do *splitter* ótico, através da utilização de um *power meter* e procedeu-se ao cálculo da diferença entre ambas as potências. Além disso, foram obtidos diagramas de olho para vários valores de *power budget* de *downstream*.

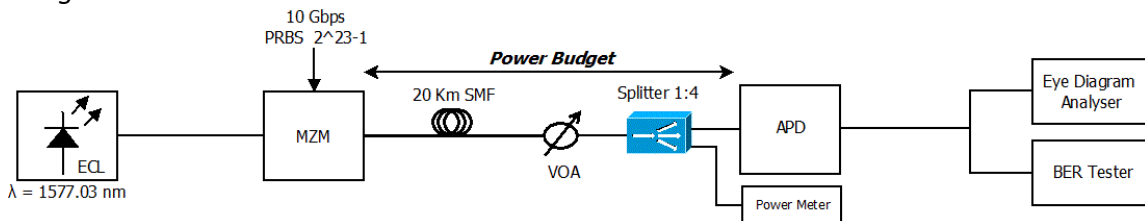


Figura 4.2.1 – Montagem experimental de sistema XG-PON – Downstream

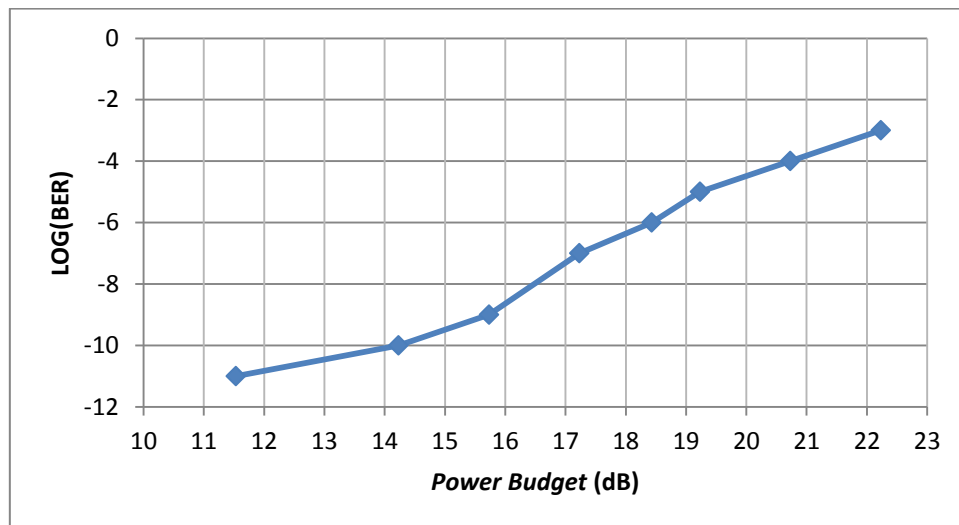


Figura 4.2.2 – BER em função do *Power Budget* de Downstream

Através da análise dos resultados obtidos, é possível verificar que para a montagem experimental efetuada um BER aceitável de 10^{-6} é possível para *power budgets* inferiores a cerca de 18.5 dB. Este valor encontra-se dentro do intervalo definido na Recomendação G.987.2 para as perdas dos caminhos óticos de sistemas XG-PON da classe N1 – 14 a 29 dB. [20] De notar que no sistema prático implementado não se tem em conta a utilização a de FEC. Desta forma, uma vez que a utilização de FEC resulta num aumento do *link budget* de aproximadamente 3/4 dB, pode-se concluir que com a utilização de FEC é possível obter BER aceitáveis para valores de *power budget* inferiores a 21.5 dB.

Nas figuras 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.5 encontram-se apresentados os diagramas de olho obtidos para os valores de *power budget* de *downstream* de 11.5, 19 e 26dB, respetivamente. Estes valores foram escolhidos por forma a verificar a degradação do diagrama de olho com o aumento do *power budget* do sistema.

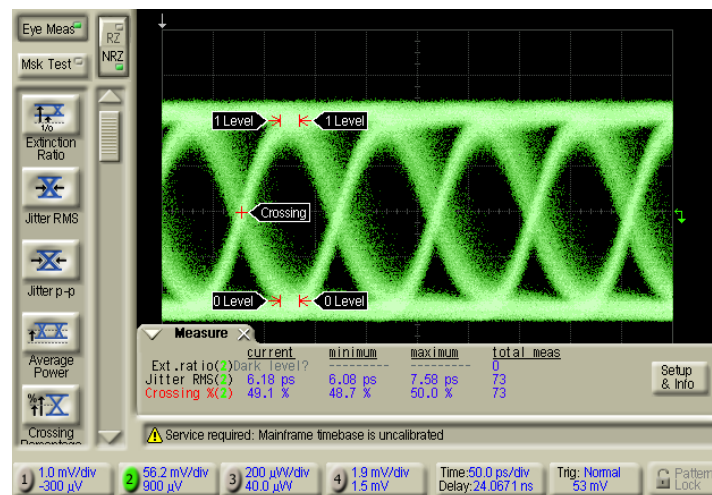


Figura 4.2.3 – Diagrama de olho para 20 Km e 11.5 dB de *power budget*

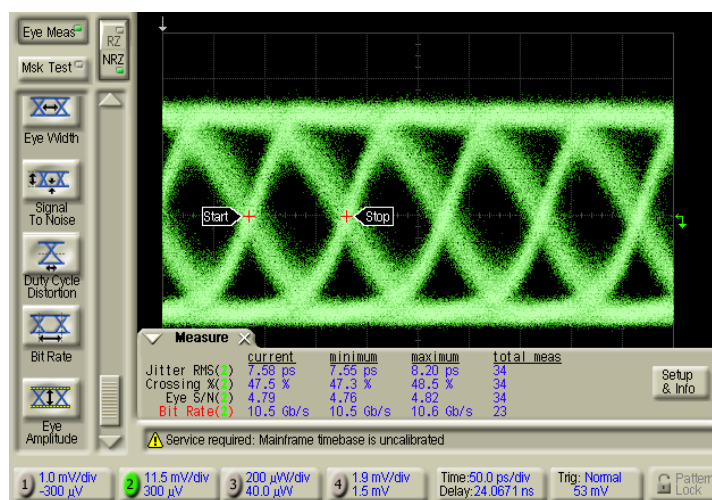


Figura 4.2.4 – Diagrama de olho para 20 Km e 19 dB de *power budget*

Através da análise do diagrama de olho da Figura 4.2.4 é possível verificar um aumento do *jitter* e uma diminuição da margem de ruído em relação ao diagrama de olho apresentado na Figura 4.2.3.

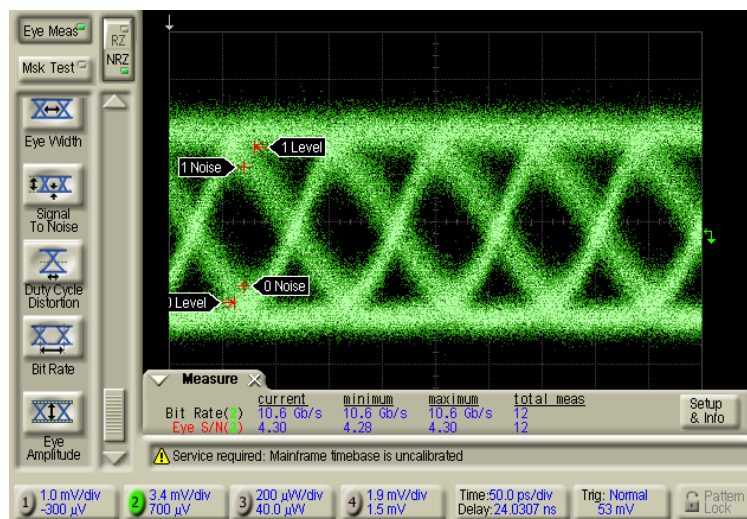


Figura 4.2.5 – Diagrama de olho para 20 Km e 26 dB de *power budget*

O mesmo sucede ao analisar o diagrama de olho da Figura 4.2.5, onde é possível verificar uma maior degradação do mesmo quando em comparação com os diagramas de olho apresentados nas figuras 4.2.3 e 4.2.4.

4.2.2 Máximo *Power Budget* de *Upstream*

Na norma XG-PON, encontra-se definida a gama de comprimentos de onda de 1260 a 1280 nm para a transmissão *upstream*. A utilização deste comprimento de onda para a realização deste teste experimental não foi possível devido ao facto de não existirem no laboratório lasers que trabalhassem na gama de comprimentos de onda definida. Por esse motivo, foi utilizado um laser DFB (*Distributed Feedback Laser*) com comprimento de onda de emissão 1310 nm, que possui um modulador de electro absorção integrado – FLD3F10NP-A. Este laser foi seleccionado uma vez que era o que possuía um comprimento de onda mais próximo do pretendido e porque permite operar até 10 Gbps. Assim, o laser foi modulado através do seu modulador integrado a 2.5 Gbps através da utilização de um gerador de pulsos com $2^{23}-1$ PRBS codificada em NRZ. Este sinal foi transmitido ao longo de 20 Km de fibra SMF de modo a ser introduzida alguma dispersão. Foi ainda utilizado um VOA de modo a emular vários *power budgets* de *upstream* e um *splitter* de 1:4 de modo a permitir medir a potência ótica à chegada do recetor ótico e a introduzir também algumas perdas adicionais ao sistema. Para a receção foi utilizado um fotodiodo PIN, o qual se ligou a um BERT (BER Tester). O sistema experimental utilizado para testar o sistema XG-PON relativamente ao seu máximo *power budget* de *upstream* encontra-se apresentado na Figura 4.2.6.

Para a realização deste teste experimental, foi utilizada a potência do sinal modulado de -1.29 dBm. Este valor apesar de se encontrar um pouco distante do definido para a potência mínima de um sistema XG-PON da classe N1 (nominal1) [20]- +2 dBm – foi o possível experimentalmente. Por fim, através da variação da atenuação imposta pelo VOA, foi obtido o BER em função do *power budget* de *upstream*.

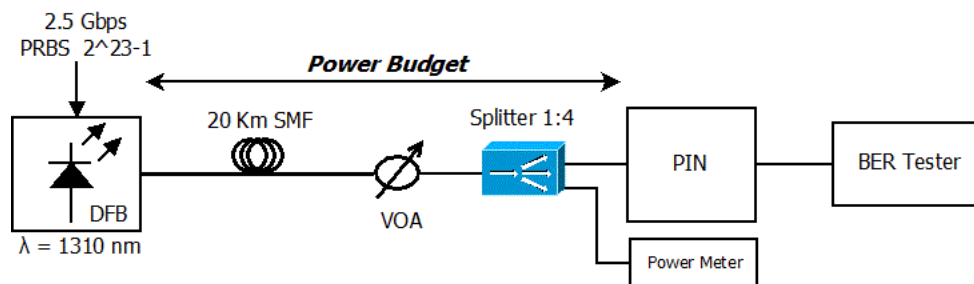


Figura 4.2.6 – Montagem experimental de sistema XG-PON – *Upstream*

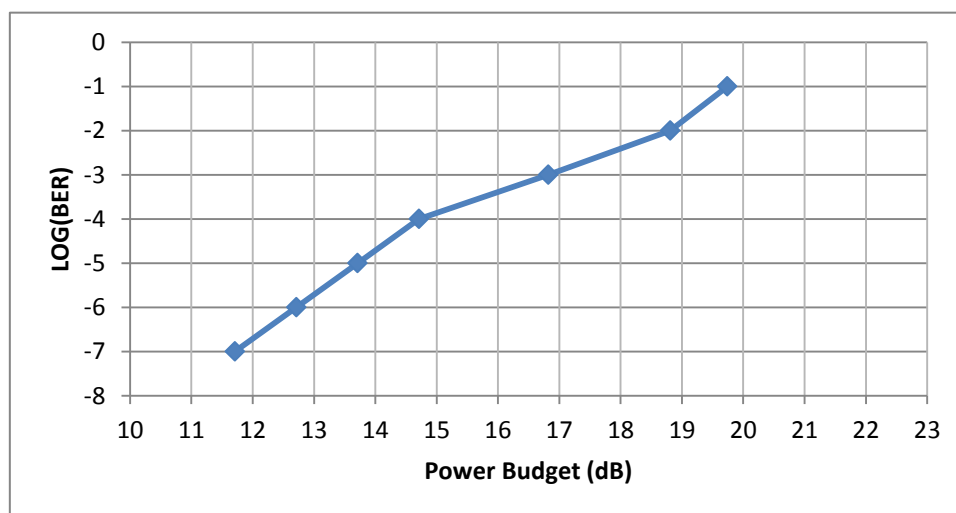


Figura 4.2.7 – BER em função do Power Budget de *Upstream*

Através da análise dos resultados obtidos, é possível verificar que para a montagem experimental efetuada um BER aceitável de 10^{-6} é possível para *power budgets* inferiores a 12.7 dB. Este valor encontra-se fora do intervalo definido na Recomendação G.987.2 para as perdas dos caminhos óticos de sistemas XG-PON da classe N1 – 14 a 29 dB. [20] Esta diferença deve-se ao facto de se ter utilizado uma potência do sinal modulado inferior em cerca de 3.3 dBm à definida na mesma recomendação para sistemas XG-PON da classe N1. Além disso, é necessário notar que o sistema prático implementado não tem em conta a utilização de FEC. Desta forma, uma vez que a utilização de FEC resulta num aumento do *link budget* de aproximadamente 3/4 dB, pode-se concluir que com a utilização de FEC é possível obter BER aceitáveis para valores de *power budget* inferiores a 15.7 dB, valor que já se encontra dentro do intervalo definido para sistemas XG-PON da classe N1.

4.3 Teste convivência G-PON, XG-PON e Vídeo

4.3.1 Montagem experimental

Neste subcapítulo pretende-se efetuar uma montagem experimental de um cenário de convivência entre os sistemas G-PON, XG-PON e vídeo. O sistema experimental utilizado para testar a convivência entre estas tecnologias encontra-se apresentado na Figura 4.3.1.

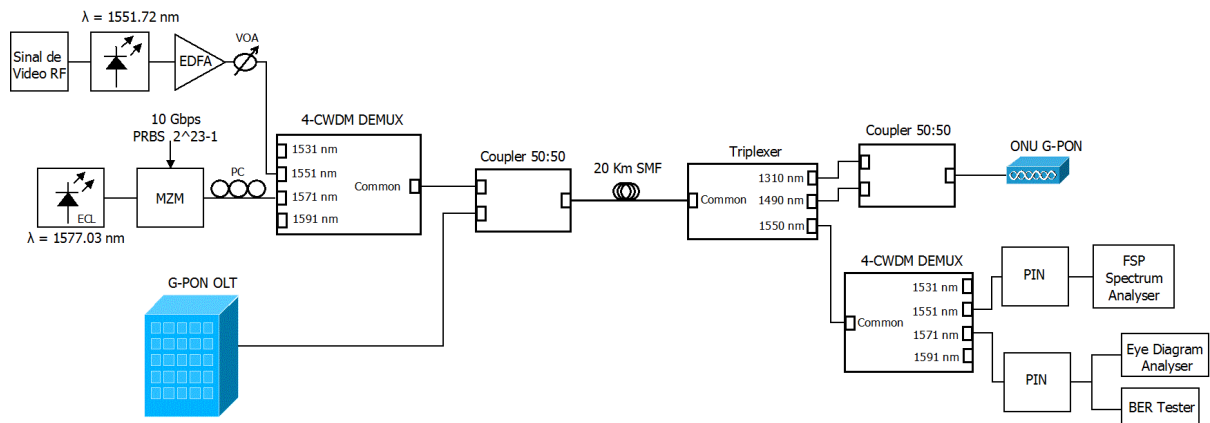


Figura 4.3.1 – Montagem experimental de cenário de convivência entre os sistemas G-PON, XG-PON e Vídeo

Neste sistema foi utilizado um sinal de vídeo gerado por um recetor da Televes, que é composto por vários canais DVB-C, o qual foi utilizado para modular um laser a 1551.72nm. Este sinal foi posteriormente amplificado utilizando um EDFA. Além disso, foi utilizado um VOA por forma a variar a sua potência à entrada do sistema bem como verificar o efeito da mudança desta nas outras tecnologias. Para a receção do sinal de vídeo foi utilizado um fotodiodo PIN, que se ligou a um analisador de espectros por forma a se medir o CNR dos canais DVB-C.

Para a tecnologia XG-PON foi utilizado um laser sintonizável ECL, o qual se sintonizou no comprimento de onda de 1577.03nm. O laser foi modulado por um MZM a 10 Gbps através da utilização de um gerador de pulsos com $2^{23} - 1$ PRBS codificada em NRZ. Foi utilizada uma potência de saída do CW de 6 dBm e um controlador de polarização por forma a maximizar a potência do sinal modulado. A potência máxima obtida do sinal modulado foi de -0.93 dBm, pelo que foi a utilizada para a realização deste teste. Para a receção foi utilizado um fotodiodo PIN, o qual se conectou a um analisador de diagramas de olho e a um BERT.

Por fim, para a tecnologia G-PON foram utilizadas a OLT e ONU G-PON e o gerador de tráfego IXIA, por forma a simular o fluxo de tráfego no sistema.

Para a multiplexagem dos diversos sinais na fibra foi utilizado um 4-CWDM Demux e um acoplador 50:50. Estes sinais foram posteriormente transmitidos ao longo de 20 Km de fibra SMF. Por fim, estes sinais foram desmultiplexados através da utilização de um triplexer e de outro 4-CWDM Demux. Estes foram utilizados devido à caracterização efetuada através da utilização de um ONA (*Optical Network Analyser*), cuja gama de funcionamento é de 1495 a 1620nm, que permitiu verificar a eficiência da desmultiplexação utilizada. Uma vez que a porta de 1550 nm do triplexer (Figura 4.3.2) permite a passagem de todos os comprimentos de onda superiores a 1515 nm, foi necessária a utilização do 4-CWDM por forma a desmultiplexar os sinais de vídeo e XG-PON através da utilização das portas de 1551nm e 1571nm, cuja caracterização se apresenta na Figura 4.3.3 e Tabela 4.3.1.

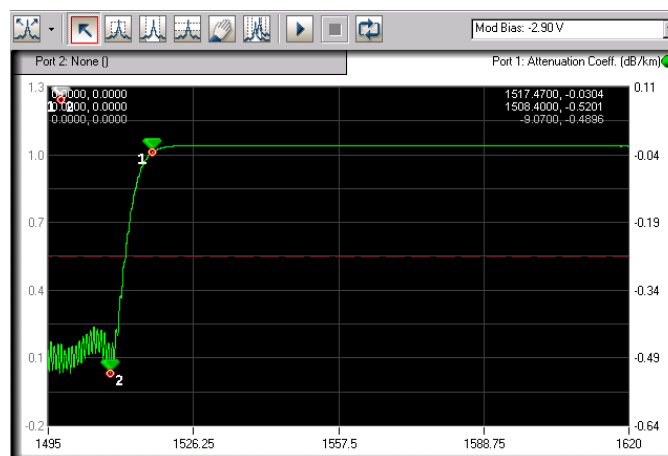


Figura 4.3.2 – Banda de passagem da porta 1550nm do Triplexer

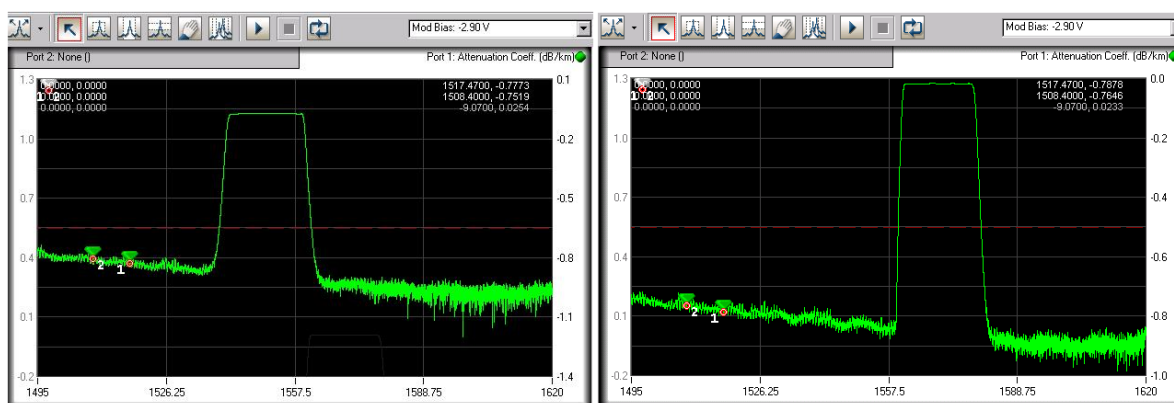


Figura 4.3.3 – Banda de passagem da porta de 1551nm (esquerda) e 1571nm (direita) do 4-CWDM Demux

Parâmetro	Unidades	Valor	
Comprimento de onda de operação	nm	1551	1571
Espaçamento entre canais	nm	20	20
Banda de Passagem do canal	nm	> 13	> 13
Perdas por inserção	dB	1.26	1.22
Isolamento entre canais adjacentes	dB	≥ 30	≥ 30
Perdas por retorno	dB	≥ 50	≥ 50
Temperatura de funcionamento	°C	0 a +70	

Tabela 4.3.1 – Caracterização 4-Demux CWDM

Por fim, devido ao facto de o triplexer efetuar a desmultiplexagem dos sinais de *downstream* e *upstream* G-PON, utilizou-se um acoplador adicional por forma a manter as ligações entre a OLT e as ONUs em ambos os sentidos, e assim permitir à ONU efetuar o seu registo no sistema. Desta forma, garantiu-se a comunicação entre a OLT e ONU G-PON.

Nesta montagem experimental, decidiu-se não utilizar nenhum *splitter*, devido ao facto de se utilizarem um grande número de filtros e acopladores 50:50 que por si só já introduzem bastantes perdas ao sistema.

4.3.2 Resultados experimentais

Na Figura 4.3.4, encontra-se apresentado o espectro ótico na entrada da fibra ótica, o qual foi obtido utilizando um OSA (*Optical Spectrum Analyser*). De notar que para este caso foi ajustado o VOA para que a potência do vídeo fosse de 6dBm. A diferença presente no espectro na gama do comprimento de vídeo é devida a amplificação imposta pelo EDFA.

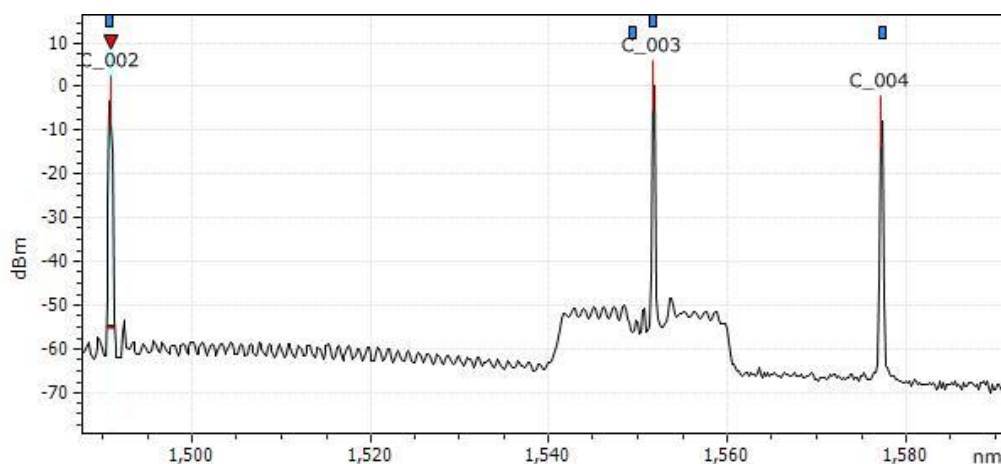


Figura 4.3.4 – Espectro ótico na entrada da fibra ótica

Para avaliar o desempenho do sistema G-PON foi utilizado o gerador de tráfego IXIA e foram enviados um milhão de pacotes a 400 Mbps e obtido o PER, cujo resultado se apresenta na Figura 4.3.5. Através do resultado obtido é possível verificar que não existiram perdas de pacotes. Por sua vez, a variação da potência do sinal vídeo também não surtiu qualquer efeito no PER do sistema G-PON. Por esse motivo, pode-se concluir que o sistema G-PON não é afetado pela convivência com as restantes tecnologias.

	Traffic Item	Tx Frames	Rx Frames	Frames Delta	Loss %
▶ 1	DS_preta	1,000,000	999,999	1	0.000
2	US-preta	1,000,000	999,999	1	0.000

Figura 4.3.5 – PER de *downstream* e *upstream* do sistema G-PON em convivência com Vídeo e XG-PON

Para avaliar o sistema XG-PON foram obtidos o BER para o cenário de convivência e os diagramas de olho para cenários de *back-to-back* e convivência. O valor obtido do BER para o cenário de convivência foi da ordem de 10^{-4} . Uma vez que a potência à chegada do PIN era de -20.4dBm, pode-se concluir que o sistema possui um *power budget* de cerca de 19.5dB. Desta forma, a ordem da grandeza do BER é devida à elevada atenuação imposta pelos filtros e acopladores utilizados na montagem experimental.

Na Figura 4.3.6 encontram-se apresentados os diagramas de olho para o cenário de *back-to-back* e para o cenário de convivência de XG-PON com vídeo e G-PON. De notar que não são apresentados os diagramas de olho para outros cenários de convivência devido ao facto de não se verificarem alterações no mesmo com a remoção de algum dos outros sinais. O mesmo sucedeu com o BER, que permaneceu constante. Por sua vez, a alteração da potência do vídeo também não surtiu qualquer alteração nos mesmos.

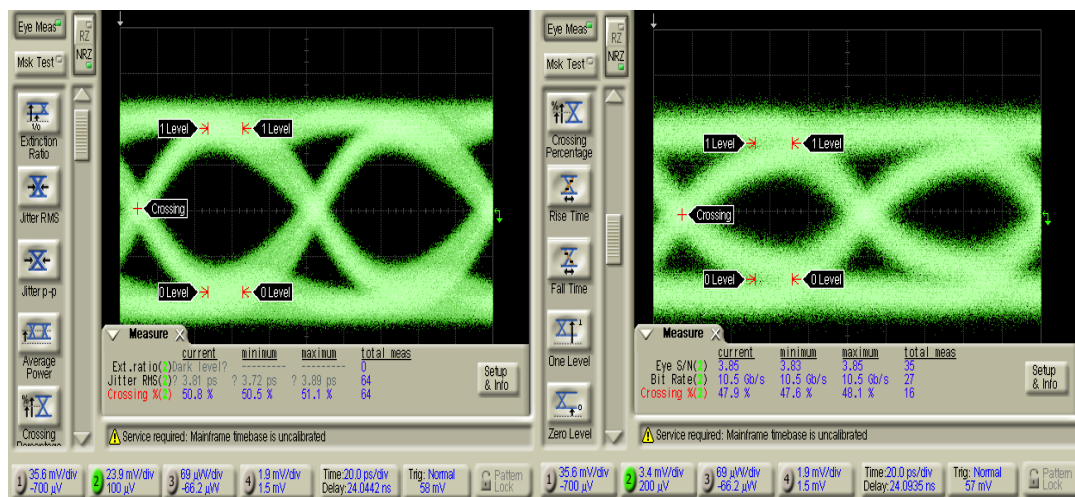


Figura 4.3.6 – Diagramas de olho para cenário *back-to-back* (esquerda) e cenário de convivência (direita)

Para avaliar a qualidade do sinal de vídeo recebido foi utilizado um analisador de espectros RF e foi de seguida avaliado o CNR dos canais DVB-C recebidos. Tal como já foi referido, a ITU-T definiu na norma G.983.3 o valor mínimo de CNR de 34 dB para a transmissão de vídeo utilizando o formato de modulação 256 QAM. [28] Uma vez que a norma DVB-C utiliza este formato de modulação tem-se que o valor mínimo de CNR do sistema utilizado é de 34 dB.

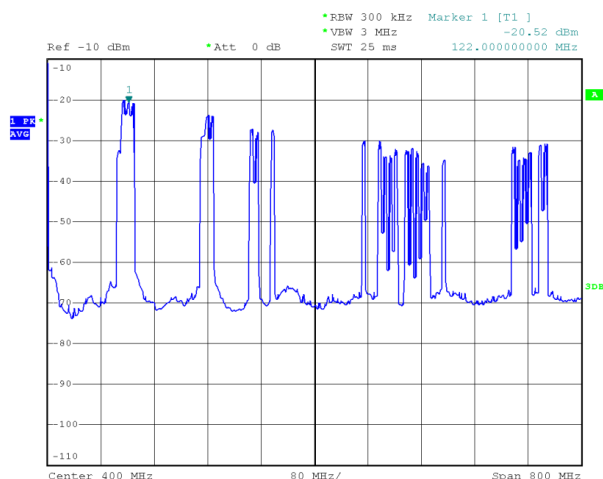


Figura 4.3.7 – Espectro do sinal de vídeo (DVB-C) recebido

Através da análise dos resultados obtidos é possível verificar que os canais de mais baixa frequência apresentam um maior CNR que os canais de mais alta frequência. Além disso, através da imagem anterior é possível verificar que todos os canais apresentam um CNR superior ao limite mínimo definido na recomendação G.983.3.

Este espectro é semelhante ao obtido para a mesma potência à entrada da fibra, dispensando-se por isso a sua representação em duplicado. Desta forma, pode-se concluir que o sinal de vídeo não é degradado ao longo da sua transmissão. Por fim, para outros cenários de convivência, não se verificaram quaisquer alterações no mesmo, pelo que se pode concluir que o sinal vídeo não é afetado pela convivência com as restantes tecnologias.

4.4 Simulação de cenário de convivência entre G-PON, XG-PON, vídeo e TWDM

Neste subcapítulo pretende-se estudar as interações adicionais que a adição da tecnologia TWDM introduz num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo. Para efetuar este estudo, efetuaram-se simulações de sistemas através da utilização do *software* VPI Systems [45]. Para o estudo destas interações entre as diversas tecnologias foi utilizado o CNR para caracterizar a qualidade dos canais de vídeo e BER para o caso dos sinais de dados digitais.

Por forma a obter valores de referência, foi inicialmente criado um cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo e obtidos os valores de BER e EVM. Por fim, dado o estudo efetuado no capítulo anterior, utilizou-se a zona da banda C disponível para o *downstream* TWDM, com um espaçamento entre canais de 200GHz, e verificou-se o efeito da sua introdução nas restantes tecnologias.

Na Figura 4.4.1 encontra-se apresentado o *setup* criado no *software* VPI Systems por forma a estudar o efeito da introdução da tecnologia TWDM num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo. Antes deste estudo, foi testada e otimizada cada tecnologia separadamente para um cenário *Back-to-Back* (BtB), por forma a verificar o correto funcionamento do *setup* implementado.

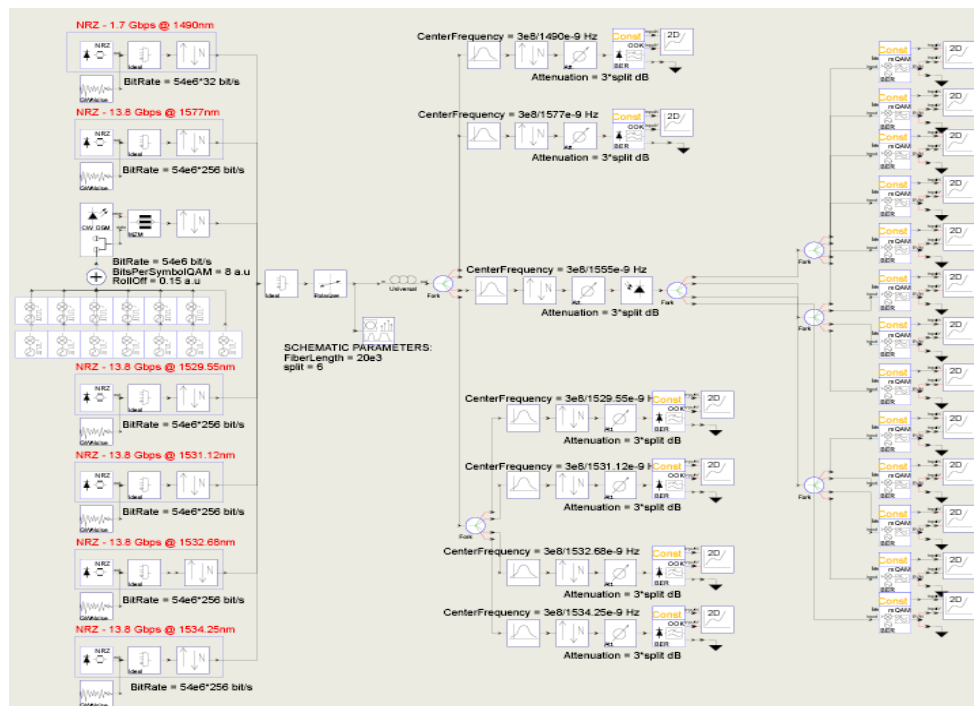


Figura 4.4.1 – *Setup* utilizado para estudo do efeito de introdução da tecnologia TWDM num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo

No estudo efetuado no capítulo anterior verificou-se que a maior degradação devida a SRS se confinaria nas baixas frequências. Desta forma, por forma a verificar a degradação imposta no vídeo, após a introdução da tecnologia TWDM, foram gerados treze canais DVB-C (256QAM) espaçados de 8MHz com frequências centrais de 56 MHz a 152 MHz. Os canais 256QAM gerados foram posteriormente filtrados através da utilização de um filtro cosseno elevado com fator de *roll-off* de 0.15. Para estes canais

foi utilizado uma taxa de transmissão de 54Mbps, uma vez que se teve em conta a taxa de símbolos apresentada em [31]: 6.75MS/s. Estes canais foram modulados opticamente utilizando laser driver para a polarização de um MZM. Por fim, variou-se a potência do laser, para que o sinal modulado possuísse uma potência de aproximadamente 17dBm @1555nm.

Para os dados foram utilizados módulos geradores de sinais NRZ aos quais foi adicionado ruído branco gaussiano por forma a simular ruído do sistema. Para a tecnologia G-PON foi transmitido um sinal NRZ a aproximadamente 0 dBm @1490nm com uma taxa de transmissão de 1.728Gbps. Por sua vez, para a tecnologia XG-PON foi transmitido um sinal NRZ com uma potência de cerca de 11dBm @1577nm com uma taxa de transmissão de 13.824Gbps. Por fim, para a tecnologia TWDM foram utilizados os comprimentos de onda de 1529.55nm, 1531.12nm, 1532.66nm, 1534.25nm os quais foram transmitidos com uma potência de cerca de 11dBm, com uma taxa de transmissão de 13.824Gbps. De notar, que as taxas de transmissão utilizadas diferem das definidas nas normas das tecnologias em questão. Tal deve-se a uma limitação do simulador, que apenas permite a simulação de múltiplos de base 2 da menor taxa de transmissão utilizada no simulador.

Estes sinais foram acoplados num modelo de fibra, que permite a simulação dos efeitos não lineares em fibras óticas. No caso dos testes efetuados foi definido um comprimento de fibra de 20 Km e foram ativados os efeitos não lineares: Auto Modulação de Fase (SPM), Modulação Cruzada de Fase (XPM), Mistura de Quatro Ondas (FWM) e Difusão Estimulada de Raman (SRS).

Para a receção dos sinais, foram utilizados filtros passa-banda e foi atenuado o sinal em 21 dB por forma a emular as perdas devidas a um *splitter* de 1:64. Para a receção dos dados foi utilizado um bloco que é constituído por um recetor ótico do tipo PIN e que permite estimar o BER do sinal em questão. Por fim, para a receção dos canais de vídeo foi utilizado um recetor ótico PIN e um módulo capaz de descodificar o sinal 256QAM e que permite a obtenção do EVM (*Error Vector Magnitude*) do mesmo.

4.4.1 Resultados obtidos

Devido ao facto de o simulador nos permitir somente a obtenção do parâmetro EVM e o valor mínimo para a transmissão de vídeo com o formato de modulação 256QAM se encontrar definido em termos do parâmetro CNR, foi necessário efetuar a conversão entre ambos.

Em sinais digitais, CNR é definido como a taxa entre a potência da portadora e a potência do ruído, sobre uma largura de banda equivalente a taxa de símbolos do canal. O valor de CNR pode ser facilmente obtido do valor de SNR, através da equação seguinte: [31]

$$\text{CNR [dB]} = \text{SNR [dB]} - 10 \log_{10} \left(1 - \frac{r}{4} \right)$$

onde r representa o fator de *roll-off*.

O valor de SNR é definido como a taxa entre a potência do canal após a aplicação do filtro com fator de *roll-off* r e a potência do ruído sobre a mesma largura de banda que no caso do CNR. Este valor de SNR pode ser obtido através do valor do EVM através da seguinte relação: [46]

$$\text{SNR [dB]} \approx 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\text{EVM}^2} \right)$$

Desta forma, estamos em condições de avaliar os resultados obtidos no âmbito das simulações efetuadas.

Na Figura 4.4.2 encontra-se apresentado o espectro ótico na entrada da fibra do sistema implementado no simulador. Foi também obtido o espectro elétrico dos canais DVB-C à entrada da fibra ótica, o qual se apresenta na Figura 4.4.3. Além disso, foi obtido o espectro dos mesmos após o fotodíodo por forma a verificar a degradação imposta nos mesmos (Figura 4.4.4). Através da observação desta última figura é possível verificar a degradação do CNR dos canais DVB-C, devida à dinâmica do efeito de Raman.

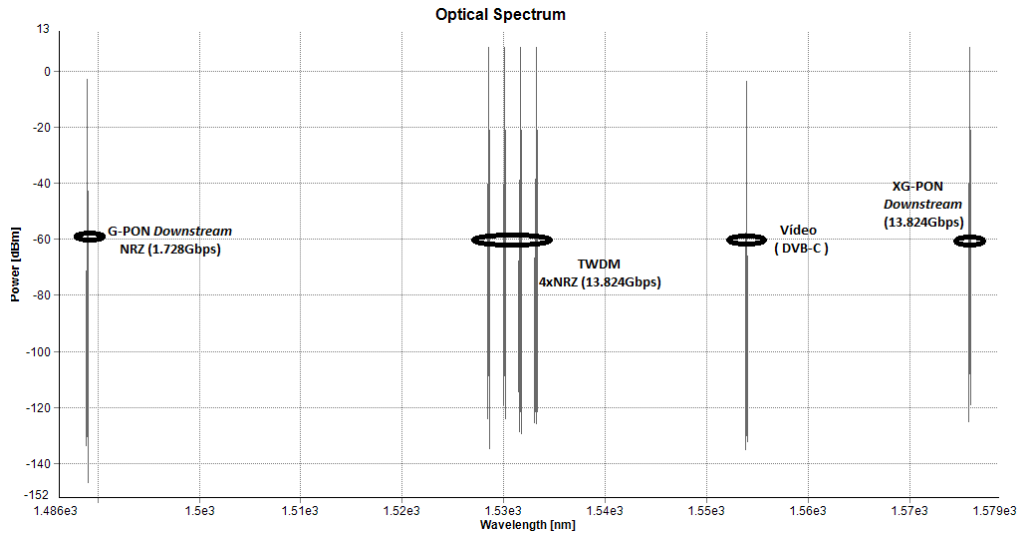


Figura 4.4.2 – Espectro ótico na entrada da fibra ótica

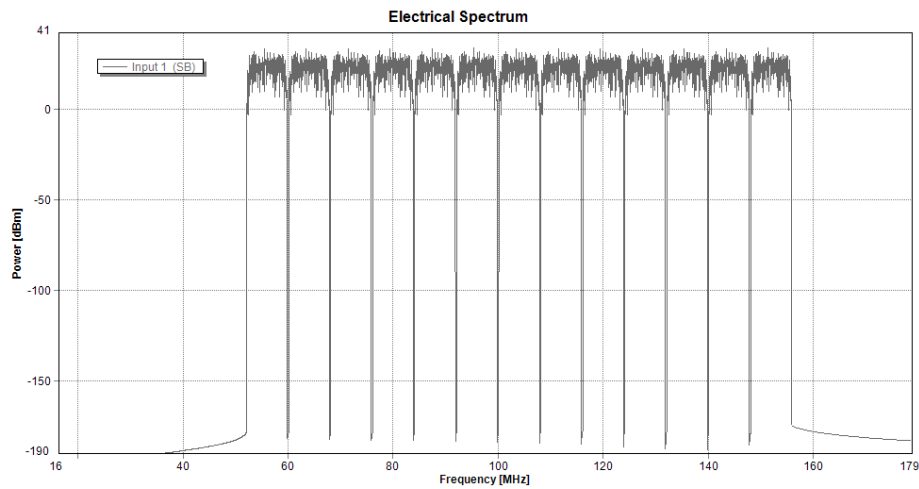


Figura 4.4.3 – Espectro dos canais DVB-C na entrada da fibra ótica

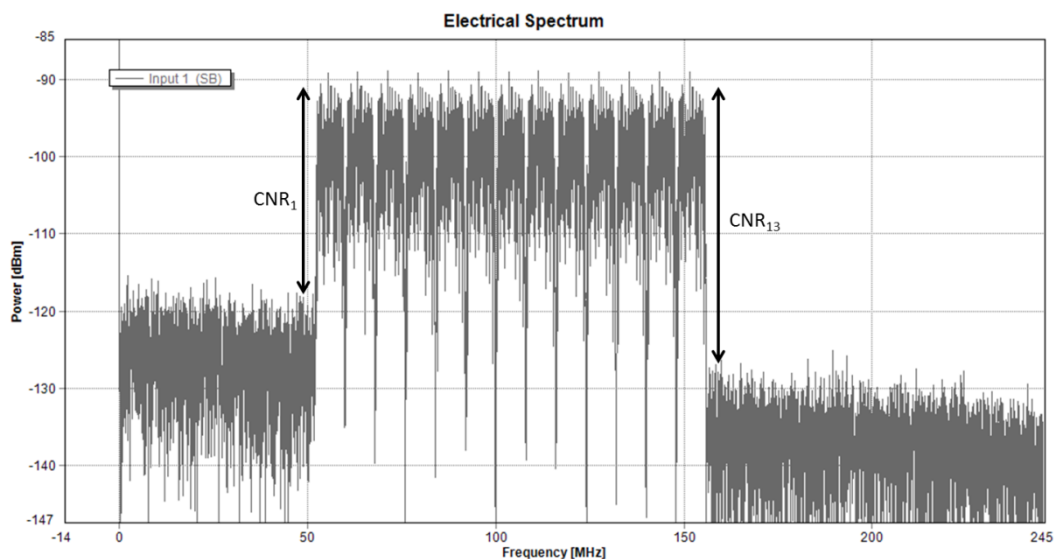


Figura 4.4.4 – Espectro dos canais DVB-C após fotodiodo
(Cenário de convivência entre G-PON, XG-PON, TWDM e vídeo)

Nas tabelas 4.4.1 e 4.4.2 encontram-se apresentados os resultados obtidos para os seguintes cenários: BtB; cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo; e cenário de convivência entre G-PON, XG-PON, vídeo e TWDM.

	BER		
	BtB	s/ TWDM	c/ TWDM
G-PON	<10E-12 (1,65E-159)	<10E-12 (7,92E-31)	<10E-12 (1,21E-26)
XG-PON	<10E-12 (6,98E-39)	1,80E-07	1,22E-07
TWDM1	<10E-12 (4,78E-41)		2,46E-08
TWDM2	<10E-12 (6,05E-42)		4,32E-11
TWDM3	<10E-12 (3,68E-41)		<10E-12 (6,27E-28)
TWDM4	<10E-12 (6,47E-42)		<10E-12 (7,88E-20)

Tabela 4.4.1 – Resultados obtidos para as tecnologias de dados
Nota: () → valores estimados por simulação

Canal	Frequência (MHz)	EVM			CNR (dB)		
		BtB	s/ TWDM	c/ TWDM	BtB	s/ TWDM	c/ TWDM
1	56	0,0071	0,0179	0,0383	43,108	35,126	28,508
2	64	0,0081	0,0176	0,0341	41,960	35,255	29,504
3	72	0,0100	0,0173	0,0338	40,150	35,389	29,597
4	80	0,0089	0,0156	0,0307	41,159	36,303	30,412
5	88	0,0123	0,0177	0,0280	38,337	35,228	31,234
6	96	0,0093	0,0144	0,0239	40,759	36,980	32,607
7	104	0,0109	0,0144	0,0217	39,429	37,009	33,443
8	112	0,0106	0,0135	0,0184	39,689	37,534	34,848
9	120	0,0094	0,0126	0,0173	40,735	38,161	35,398
10	128	0,0114	0,0134	0,0162	39,000	37,647	35,973
11	136	0,0084	0,0109	0,0140	41,728	39,413	37,265
12	144	0,0097	0,0125	0,0138	40,474	38,198	37,337
13	152	0,0071	0,0103	0,0124	43,115	39,938	38,319

Tabela 4.4.2 – Resultados obtidos para canais de vídeo - DVB-C (256QAM)

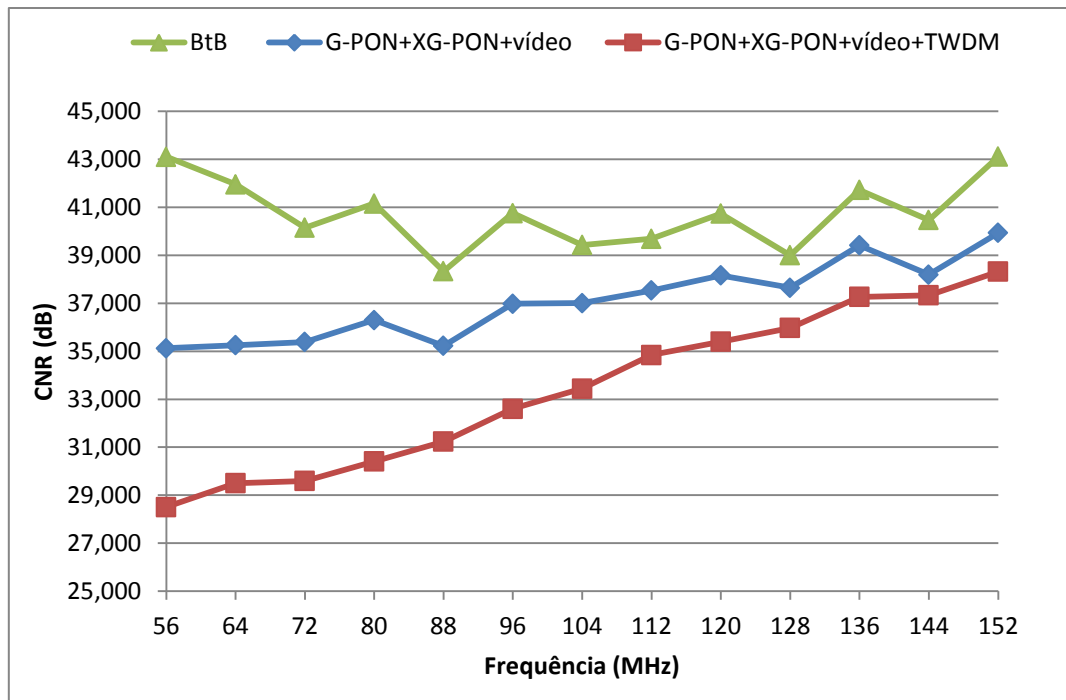


Figura 4.4.5 – CNR dos canais DVB-C (256-QAM) para cenários de convivência (GPON 0 dBm @1490nm, XG-PON 11dBm @1577nm, Vídeo 17dBm @1555nm, TWDM 11dBm @1529.55nm, 1531.12nm, 1532.66nm, 1534.25nm)

4.4.2 Conclusões

Tal como já foi referido a ITU definiu na norma G.983.3 o valor mínimo de CNR (*Carrier-to-Noise Ratio*) de 34 dB para a transmissão de vídeo utilizando o formato de modulação 256 QAM (DVB-C).

Tal como esperado, foi possível verificar através da análise dos resultados obtidos que a introdução da tecnologia TWDM provoca uma degradação adicional nos canais de vídeo. Dados os requisitos mínimos para a transmissão de vídeo utilizando o formato de modulação 256QAM pode-se verificar que, nas condições consideradas, não é possível para os operadores utilizar canais de vídeo com frequências até cerca de 112MHz.

Cada canal DVB-C pode transmitir de 7 a 24 sinais de televisão digital, uma vez que um sinal de televisão digital tem usualmente cerca de 2-7 Mbps quando comprimido com MPEG-2. [31] É possível então concluir que a introdução da tecnologia TWDM limita a utilização dos canais de vídeo nas baixas frequências, impossibilitando a transmissão de sete canais de vídeo, correspondente a transmissão de 49 a 168 sinais de televisão digital.

Por sua vez, através da análise dos resultados obtidos para as tecnologias de dados, é possível se verificar uma pequena degradação nos seus resultados. No entanto, esta degradação não impossibilita a utilização da gama disponível da banda C para a tecnologia TWDM, uma vez que as restantes tecnologias permaneceram com valores aceitáveis. É necessário notar também que os resultados obtidos não têm em conta a utilização de FEC, cuja utilização é obrigatória na tecnologia XG-PON.

4.5 TWDM – Teste da estabilidade do comprimento de onda de emissão para laser sintonizável controlado por temperatura

Tal como já foi referido anteriormente, uma das tecnologias chave da tecnologia TWDM são os transmissores das ONUs, uma vez que devem de ser capazes de sintonizar qualquer dos comprimentos de onda de *upstream*. Uma vez que o controlo do comprimento de onda de emissão do laser está relacionado com a temperatura do mesmo, é necessário verificar o quanto a variação da temperatura ambiente afeta o mesmo. Assim, neste subcapítulo pretende-se testar e verificar a estabilidade do comprimento de onda de emissão de um laser sintonizável cuja temperatura é controlada com o auxílio de um TEC (*Thermoelectric cooler*) e de uma interface desenvolvida no IT que permite a variação dos parâmetros de um controlador PID, de modo a controlar a temperatura do laser no valor pretendido.

Uma vez que no laboratório apenas se encontravam disponíveis lasers sintonizáveis da banda C, foi utilizada esta banda para o teste dos mesmos. Para a realização deste teste utilizou-se uma câmara térmica, na qual foi colocado o laser e ajustada a temperatura do TEC e os valores dos parâmetros do controlador PID para que o comprimento de onda do laser permanecesse no pretendido. Por fim, utilizando um OSA, obteve-se a variação do comprimento de onda de emissão do laser para várias temperaturas da câmara. De notar que para medição foi efetuada tendo o cuidado de aguardar o tempo necessário que a temperatura da câmara estabilizasse no valor pretendido.

Este teste foi efetuado para quatro comprimentos de onda distintos com uma separação de 100 GHz entre si. Na Figura 4.5.1, encontram-se apresentadas as variações do comprimento de onda máximas em função da temperatura da câmara. Na legenda do gráfico, encontra-se também apresentada a temperatura de operação de cada laser por forma a permanecer no comprimento de onda indicado.

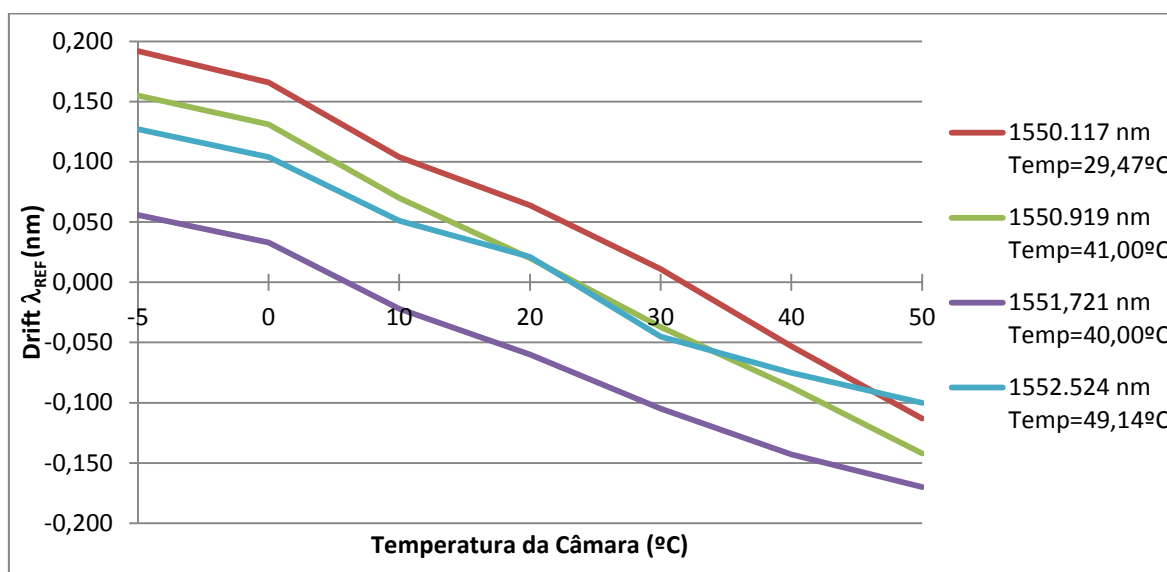


Figura 4.5.1 – Variação dos comprimentos de onda do laser em função da temperatura da câmara térmica

Supondo que se utilizariam OADMs (*Optical Add Drop Multiplexers*) de 100 GHz para cada um dos canais, pode-se verificar a viabilidade da utilização do controlo por temperatura. Tendo como referência a caracterização de um OADM para o canal 23 (1551.72 nm) - Figura 4.5.2 - é possível verificar que este possui uma banda de passagem de cerca de ± 0.25 nm em relação ao seu comprimento de onda referência.

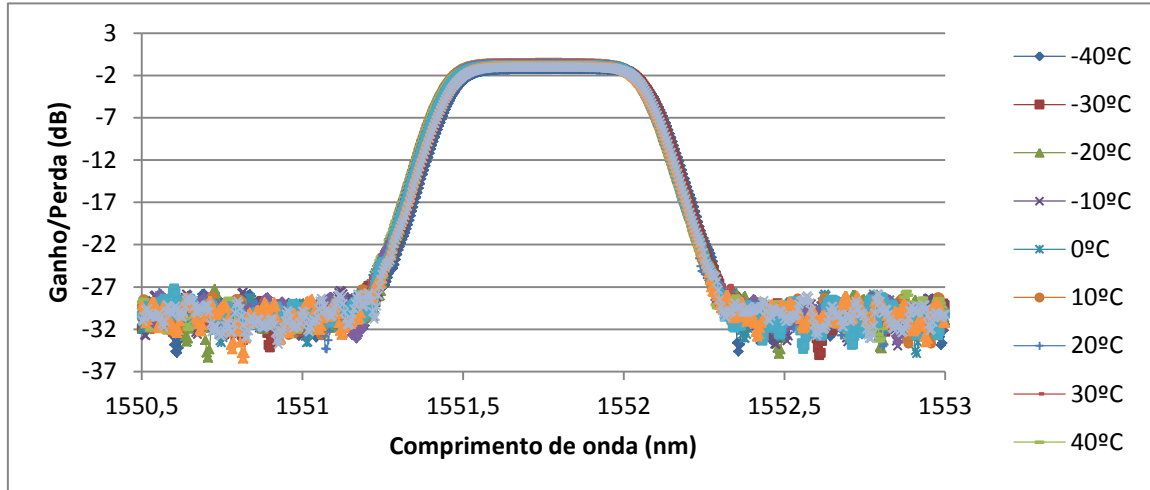


Figura 4.5.2 – Caracterização OADM de 100 GHz correspondente ao canal 23 do *grid* ITU (1551.72 nm)

Desta forma, analisando os resultados obtidos para a variação do comprimento de onda do laser em função da temperatura da câmara térmica é possível concluir que utilizando um ADD/DROP de 100GHz, o sistema iria funcionar corretamente para toda a gama de temperatura testada [-5 a 50°C]. Assim, é também possível concluir que o controlo do comprimento de onda de emissão do laser através da utilização de um TEC é eficiente, mostrando-se como uma opção viável para tornar a ONU sintonizável.

Além disso, dado que o preço de um TEC é reduzido e uma vez que é do interesse dos operadores possuir ONUs o mais barato possíveis, esta opção mostra-se também viável a nível económico.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

Devido ao crescimento na oferta de serviços das redes de acesso atuais e à demanda contínua de largura de banda por parte dos utilizadores, as tecnologias PON existentes atualmente deixarão, num curto espaço de tempo, de ser capazes de satisfazer as necessidades dos mesmos. Por este motivo, é necessário prosseguir com o estudo da evolução destas redes.

Nesta dissertação foi apresentado um estudo das tecnologias existentes atualmente e dos requisitos que se encontram especificados nas suas normas para a convivência entre estas e as que se pretendem implementar num futuro próximo. Além disso, foram estudados vários cenários de convivência entre as tecnologias existentes, por forma a verificar as limitações existentes relativamente ao espectro atual, de modo a verificar a viabilidade de integração de uma das tecnologias candidatas para NG-PON2, a tecnologia TWDM-PON.

Primeiramente foi analisado o espectro ocupado por G-PON e analisada a ocupação do espectro para o caso de convivência deste com vídeo. Através das opções espectrais da norma G-PON foi possível concluir que a utilização desta tecnologia deixa ainda disponíveis as bandas E, C e L para serviços de próxima geração e vídeo. Caso se pretenda a convivência desta com vídeo, a banda C é ocupada quase na sua totalidade, ficando apenas disponível, nesta banda, a gama de 1530 a 1535nm.

De seguida, foi analisado o espectro ocupado por XG-PON e analisada a ocupação do espectro atual para os cenários de convivência possíveis entre esta tecnologia e as referidas anteriormente. Através desta análise foi possível concluir que o cenário de coexistência de G-PON com XG-PON se torna um cenário bastante interessante uma vez que a ausência do vídeo permite libertar a banda C na sua totalidade. Além desta banda, estão disponíveis a parte superior da banda O, a banda E e a banda L quase na sua totalidade. Por sua vez, o caso de coexistência entre XG-PON, G-PON e vídeo deixa disponível a parte superior da banda O, a gama de 1530 a 1535nm da banda C e quase a totalidade da banda E e L. Estas bandas serão então as bandas disponíveis para a integração das tecnologias candidatas a NG-PON2 por forma a serem compatíveis com todas as tecnologias anteriores.

Analisando as bandas disponíveis para a implementação da tecnologia NG-PON2 foi possível concluir que as tecnologias anteriores ocupam uma grande parte da janela de comprimentos de onda onde as perdas da fibra são baixas. A utilização da parte superior da banda O ou da banda E requer a utilização de fibras com um baixo *water peak* (G.652.C/D) por forma a minimizar a atenuação da fibra nesta gama de comprimentos de onda. Este fator é limitativo uma vez que a convivência da tecnologia NG-PON2 com as tecnologias anteriores só seria possível caso os sistemas implementados utilizassem este tipo de fibras. Desta forma, restam apenas a banda L e a gama de 1530 a 1535nm da banda C para a implementação de NG-PON2.

Assim, no âmbito desta dissertação decidiu-se proceder ao estudo da interferência devida à dinâmica do efeito de SRS sobre o vídeo em ambientes de convivência com sinais NRZ. Através deste estudo foi possível retirar conclusões relativamente às dependências deste efeito da: potência do canal modulado, separação entre canal/canais modulado(s) e canal CW, número de canais modulados presentes, espaçamento entre os canais modulados e taxa de transmissão dos mesmos.

Através dos resultados obtidos, foi possível concluir que o espaçamento entre canais de 200GHz seria a opção mais viável uma vez que além de induzir um menor *crosstalk*, permite aos operadores possuir lasers com requisitos mais alargados e não tem a necessidade de possuir um controlo extramente preciso da temperatura. Desta forma, dada a ocupação atual do espectro e tendo em conta a possível coexistência com as restantes tecnologias, pode-se concluir que a utilização da banda disponível na banda C (1530-1535nm) se torna viável para o *downstream* TWDM. Apesar de se ter verificado que a influência do *crosstalk* é inferior para gamas de comprimentos de onda um pouco superiores (p.e. 1535-1540nm) esta não foi tomada como opção uma vez que requereria a alteração dos filtros de vídeo atualmente utilizados.

Assim, procedeu-se ao estudo das interações adicionais que a adição da tecnologia TWDM introduz num cenário de convivência entre G-PON, XG-PON e vídeo. Este estudo foi efetuado com base em simulações de sistemas através da utilização do *software* VPI Systems e permitiu concluir que, para as condições consideradas, a introdução da tecnologia TWDM limita a utilização dos canais de vídeo nas baixas frequências, impossibilitando a transmissão de sete canais de vídeo. Uma vez que um sinal de televisão digital tem usualmente cerca de 2-7 Mbps quando comprimido com MPEG-2 [31], cada canal DVB-C permite a transmissão de 7 a 24 sinais de televisão digital. Assim, é possível concluir que a introdução da tecnologia TWDM limita a transmissão de 49 a 168 sinais de televisão digital. Além disso, permitiu verificar uma pequena degradação nas tecnologias G-PON e XG-PON, mas que não impossibilitaria a utilização da gama disponível da banda C para a tecnologia TWDM.

Além disso, foi também possível concluir através de resultados experimentais, que o controlo do comprimento de onda de emissão do laser através da utilização de um TEC é eficiente uma vez que permitiria o funcionamento dos lasers para toda a gama de temperatura testada. Assim, a utilização de um TEC para controlo do comprimento de emissão do laser mostrou-se como uma opção viável para tornar a ONU sintonizável. Esta opção, dados os custos de um TEC, mostrou-se também uma opção viável a nível económico.

5.2 Trabalho Futuro

Atualmente já foi efetuada a demonstração de um protótipo de um sistema TWDM-PON, e da possibilidade de convivência com as tecnologias G-PON e XG-PON. Nesta demonstração, além dos 40 Gbps de capacidade, o protótipo utilizado providencia um *power budget* de 38 dB que permite suportar 20 Km e um *split ratio* de 1:512. Foram também testadas as configurações do ODN para um *split ratio* de 1:128 e 40 Km e para um *split ratio* de 1:64 e 60 Km, e foram obtidos resultados semelhantes [22]. No entanto o sistema demonstrado redefine a banda C, não permitindo por esse motivo a convivência com vídeo.

Dado o estudo efetuado no âmbito desta dissertação seria interessante efetuar o estudo experimental da utilização da banda de 1530 a 1535nm para o *downstream* da tecnologia de TWDM quando em convivência com as restantes tecnologias. A partir daí selecionar a potência requerida para que fossem cumpridos os requisitos de NG-PON2 e verificar o efeito real do *crosstalk* induzido nos canais de vídeo.

Uma vez que neste trabalho foi estudado o efeito de Raman de canais NRZ na banda C, seria interessante expandir este estudo para outras gamas de comprimentos de onda, bem como efetuar o estudo do efeito de outros formatos de modulação avançados para o sistema de dados, como por exemplo, a modulação QAM, QPSK, 8-PSK, QDB (*Quadrature Duobinary*).

Por último, face aos inconvenientes trazidos pelo efeito de Raman sobre o vídeo, seria de grande interesse o estudo de técnicas para a diminuição deste efeito.

Anexo A. Efeitos lineares e não lineares

A.1. Introdução

O desenvolvimento de fibras óticas de baixas perdas, lasers semicondutores eficientes e compactos que operam à temperatura ambiente, recetores óticos e amplificadores óticos revolucionaram o mundo das telecomunicações.

Quando os impulsos de informação se propagam através de uma fibra ótica vão sofrer atenuação, dispersão. Além disso, irão interagir uns com os outros através de efeitos não lineares da fibra. Estes efeitos tendem a distorcer os sinais, resultando em perda de informação ou em interferência entre diferentes canais.

O aumento da capacidade de um canal ótico é obtido tanto pelo aumento da taxa de transmissão, como pela utilização da técnica de WDM, onde múltiplos comprimentos de onda que transportam canais independentes são multiplexados e se propagam simultaneamente através da mesma fibra. Uma forma que os operadores encontraram para economizar na implantação das suas redes de telecomunicações foi através do aumento do espaçamento entre repetidores óticos. No entanto, para se conseguir tal objetivo e se atingir a relação sinal ruído pretendida, é necessária uma potência ótica superior. Com o aumento das potências óticas, taxas de transmissão e número de canais de comprimentos de onda, a potência ótica total que se propaga através da fibra aumentou consideravelmente, tornando significativo o papel dos efeitos não lineares na propagação de impulsos em fibra ótica. Assim, o papel dos efeitos não lineares tornou-se ainda mais preponderante devido à propagação de longas distâncias e às pequenas áreas do núcleo das fibras óticas que transportam cada vez maiores intensidades. Estes efeitos não lineares incluem Auto Modulação de Fase (SPM), Modulação Cruzada de Fase (XPM), Mistura de Quatro Ondas (FWM), Difusão Estimulada de Raman (SRS) e Difusão Estimulada de Brillouin (SBS).[47]

A.2. Efeitos lineares

A.2.1. Atenuação

A atenuação é uma característica importante na transmissão através de fibra ótica. A atenuação é imposta por vários mecanismos que atenuam o sinal ótico aquando da sua propagação ao longo da fibra ótica. Uma vez que os recetores óticos necessitam de uma quantidade mínima de potência ótica para recuperar a informação transmitida, as perdas na fibra determinam a máxima distância a que um sinal pode ser transmitido. Desta forma, a atenuação é um fator limitador em sistemas de comunicações óticas de grandes distâncias. No entanto, é possível utilizar múltiplos estágios de amplificadores óticos para compensar as perdas das fibras. Estes amplificadores, apesar de amplificarem o sinal, adicionam ruído ao sistema. Além disso, introduzem custos ao sistema, o que não é desejável para os sistemas de redes óticas passivas atuais.

Os mecanismos de atenuação básicos numa fibra são a absorção do material, espalhamento de Rayleigh e perdas por radiação da energia ótica. A absorção está relacionada com o material constituinte da fibra. Por sua vez, o espalhamento Rayleigh está relacionado com o material constituinte da fibra e com imperfeições estruturais do guia de onda. Por fim, a atenuação devida a efeitos de radiação tem como origem perturbações na geometria das fibras. [48]

Quando um sinal ótico com uma potência ótica P_{in} é propagado através de uma fibra ótica, a sua potência ótica diminui de forma exponencial com a distância, sendo a sua potência após uma propagação de uma distância z dada por [48]:

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha_p z} \quad (A.2.1)$$

onde α_p é o coeficiente de atenuação. Este coeficiente é dado geralmente em unidades como km^{-1} e é dado por:

$$\alpha_p = \frac{1}{z} \ln \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (A.2.2)$$

No entanto, por simplicidade no cálculo da atenuação de um sinal ótico numa fibra, é comum se expressar o coeficiente de atenuação em unidades de dB/km. Designando este parâmetro por α , tem-se que [48]:

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{10}{z} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = 4.343 \alpha_p(\text{km}^{-1}) \quad (A.2.3)$$

Este parâmetro é geralmente chamado atenuação da fibra. Na Figura A.2.1 é possível verificar a atenuação de uma fibra *standard* SMF (G.652 SMF) e de uma fibra ZWP (*zero water peak*) - G.652 C/D SMF - em função do comprimento de onda. De notar que o *water peak* presente nas fibras *standard* SMF tornam a banda de 1360 a 1480 nm inutilizável para a transmissão de dados.

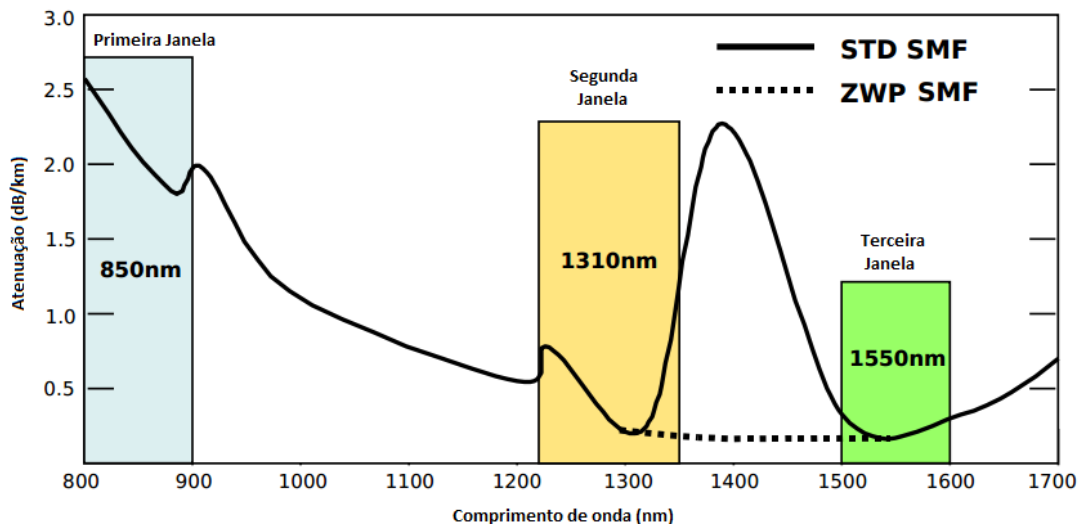


Figura A.2.1 – Perdas devidas a atenuação em função do comprimento de onda para fibra *standard* SMF e fibra *zero water peak* [8]

Através da observação da Figura A.2.1 é possível verificar três regiões onde as perdas devidas a atenuação são menores: 0.85, 1.30 e 1.55 μm . Devido às baixas perdas, as janelas de 1.30 e 1.55 μm são as mais utilizadas nos sistemas PON atuais.

A.2.2. Dispersão

A dispersão de um pulso ótico é um outro efeito prejudicial na transmissão através de fibras óticas que limita os sistemas de comunicação com alto ritmo de transmissão e grandes distâncias. Este efeito leva a um espalhamento dos pulsos óticos, que pode levar à interferência entre símbolos.

Existem dois tipos de dispersão em fibras óticas: dispersão intermodal e intramodal. A dispersão intermodal é dominante quando se utiliza fibras multimodo. Em fibras monomodo normais SMF, a dispersão intermodal desaparece uma vez que a energia do sinal ótico é acoplada num único modo de propagação. Assim, para fibras SMF a dispersão total será dada apenas pela dispersão intramodal, também chamada dispersão cromática. A dispersão cromática é a diferença no atraso de propagação para diferentes componentes espectrais de um sinal ótico. As duas principais causas para a dispersão cromática são a dispersão material e a dispersão do guia. Devido ao facto de as fibras utilizadas atualmente serem do tipo SMF nesta secção apenas será abordada a dispersão cromática. [48]

A.2.2.1. Dispersão cromática

A dispersão cromática resulta do facto de componentes de frequências diferentes de um sinal ótico possuírem diferentes velocidades de grupo numa fibra ótica.

Tal como já foi referido, a dispersão cromática é composta pela dispersão material e pela dispersão do guia. A dispersão material resulta da variação do índice de refração do material constituinte do núcleo da fibra em função do comprimento de onda. Por sua vez, a dispersão do guia é devida à estrutura do guia de onda de uma fibra ótica, uma vez que os parâmetros de propagação dependem da estrutura do mesmo. Numa fibra SMF apenas cerca de oitenta por cento da potência ótica é confinada no núcleo da fibra. Assim, a dispersão do guia de onda surge devido ao facto de os restantes vinte por cento da luz, que se propagam na bainha, viajarem mais rapidamente que a luz que se encontra confinada no núcleo. [48]

Geralmente a dispersão em fibras SMF é designada por D . A dispersão é geralmente interpretada como o atraso que um impulso sofre em relação a outro, com comprimentos de onda centrais deslocados de 1 nm, após propagarem-se em 1 km de fibra e tem como unidades ps/(nm.km).

Para a obtenção teórica da dispersão cromática geralmente assume-se que a dispersão material e a dispersão do guia podem ser calculadas separadamente e adicionadas por forma a se obter a dispersão total do modo que se propaga na fibra.

Assim, o parâmetro de dispersão de uma fibra SMF é dado por [48]:

$$D_{cro} = D_m + D_w = -\frac{\lambda_0}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2} - \frac{n_1 \Delta}{c \lambda_0} \left(V \frac{d^2(bV)}{dV^2} \right) \quad (\text{A.2.4})$$

Através da análise da equação (A.2.4) é possível validar o que foi dito anteriormente. O primeiro termo, correspondente à dispersão material, apresenta uma dependência com o índice de refração da fibra. Por sua vez, através da análise do segundo termo é possível verificar a sua ligação com a estrutura da fibra.

De modo a se verificar a influência de cada um dos termos, na Figura A.2.2, apresenta-se a variação da dispersão com o comprimento de onda para uma fibra *standard* SMF, e da respetiva dispersão material e do guia. Desta forma, é possível verificar qual a dispersão predominante em cada comprimento de onda.

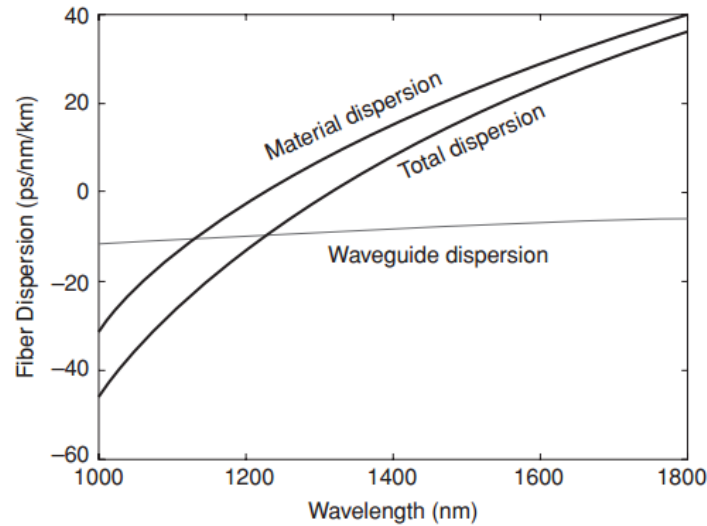


Figura A.2.2 – Coeficiente de dispersão em função do comprimento de onda numa fibra SMF [2]

A.3. Efeitos não lineares

A.3.1. Auto Modulação de Fase (SPM)

Muitas vezes, é assumido que o índice de refração da sílica é independente da potência. No entanto, na realidade, todos os materiais se comportam de forma não linear para potências elevadas, aumentando o seu índice de refração com a intensidade ótica. Na sua forma mais simples, o índice de refração pode ser escrito como:

$$\tilde{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2 \quad (\text{A.3.1})$$

onde $n(\omega)$ é a parte linear do índice de refração, $|E|^2$ a intensidade ótica dentro da fibra e n_2 o coeficiente não linear que está relacionado com a suscetibilidade de terceira ordem[40].

A dependência da potência do índice de refração verificada em (A.3.1) tem a sua origem em processos paramétricos de terceira ordem ($X^{(3)}$). A origem dos processos paramétricos reside na resposta não linear dos eletrões ligados de um material aplicado a um campo ótico. Mais concretamente, a polarização induzida no meio é não linear no campo aplicado, mas contém termos não lineares cuja magnitude

é governada pelas suscetibilidades não lineares. Como resultado, a polarização total induzida pelos dipolos elétricos é não linear no campo elétrico E , mas satisfaz a relação mais geral: [40]

$$P = \varepsilon_0 (X^{(1)} \cdot E + X^{(2)} : E E + X^{(3)} : E E E + \dots) \quad (\text{A.3.2})$$

onde ε_0 é a permissividade do vácuo e $X^{(j)}$ ($j=1,2,\dots$) é a suscetibilidade de ordem j .

SPM refere-se ao deslocamento de fase de autoindução experimentado por um campo óptico durante a sua propagação em fibras ópticas. SPM surge porque o índice refrativo da fibra tem um componente dependente da intensidade, como pode ser verificado pela equação (A.3.1).

A magnitude do campo óptico pode ser obtida notando que as alterações de fase de um campo óptico são dadas por:

$$\phi = \tilde{n} k_0 L = (n + n_2 |E|^2) k_0 L \quad (\text{A.3.3})$$

onde $k_0 = 2\pi/\lambda$ e L o comprimento da fibra óptica.

Através da análise da equação anterior é possível identificar a dependência que o desfasamento de fase possui em relação à intensidade do campo elétrico. Desta forma, o desfasamento de fase não linear é dado por:

$$\phi_{NL} = n_2 |E|^2 k_0 L \quad (\text{A.3.4})$$

Assim, o índice refrativo não linear causa um deslocamento de fase que é proporcional à amplitude do impulso, o que leva a que diferentes partes do impulso sofram mudanças de fase diferentes, que dão origem ao chamado *chirp*. O espectro também será alterado, podendo comprimir ou alargar, sendo que caso este último seja significativo pode causar interferência entre canais vizinhos em sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) [49].

Na Figura A.3.1 pode ser verificado o desfasamento na frequência sofrido por um impulso Gaussiano. A frente do impulso sofre um deslocamento de frequência negativo causando uma diminuição nas suas frequências. A traseira do impulso sofre um deslocamento de frequência positivo causando um aumento das suas frequências.

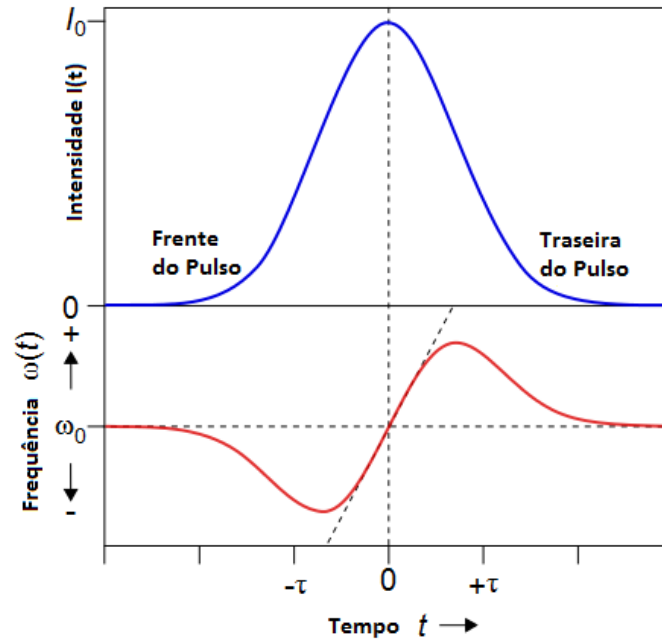


Figura A.3.1 – Variação temporal do desfasamento de frequência causado por SPM num pulso Gaussiano [50]

O efeito do *chirp* depende do sinal do parâmetro de dispersão da velocidade de grupo (β_2). Se a dispersão cromática é normal, $\beta_2 > 0$, as frequências mais baixas tenderão a propagar-se mais rapidamente e as frequências mais altas a propagar-se mais lentamente, o que leva a um alargamento do impulso. Se a dispersão é anormal, $\beta_2 < 0$, o oposto ocorre, as frequências mais altas propagam-se mais lentamente do que as frequências mais baixas, o que resulta numa compressão do impulso.[39]

A.3.2. Modulação de Fase Cruzada (XPM)

Quando dois ou mais campos óticos com diferentes comprimentos de onda se propagam numa fibra, eles irão interagir um com os outros através das não linearidades da fibra, tais como XPM. XPM ocorre porque o índice de refração efetivo visto por um feixe ótico num meio não linear depende não só da intensidade do feixe, mas também da intensidade dos outros feixes que estão a ser propagados simultaneamente. Assim, XPM refere-se ao deslocamento de fase de um campo ótico induzido por outro campo com diferente comprimento de onda, direção, ou estado de polarização. [37] [40] A sua origem pode ser compreendida observando o campo elétrico quando dois campos óticos a frequências ω_1 and ω_2 , polarizados ao longo do eixo x, propagando-se simultaneamente na mesma fibra: [40]

$$E = \frac{1}{2} \hat{x} [E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + c.c.] \quad (\text{A.3.5})$$

onde c.c. significa complexo conjugado.

O desfasamento não linear de fase para o campo ótico à frequência ω_1 pode ser escrito como:

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_1|^2 + 2|E_2|^2) \quad (\text{A.3.6})$$

O primeiro termo da equação (A.3.6) é devido a SPM e o segundo termo é devido a XPM. Analisando a expressão, pode-se verificar que para dois campos óticos a diferentes comprimentos de onda igualmente intensos, o efeito de XPM é duas vezes mais efetivo que SPM e que a presença de XPM é sempre acompanhada pela existência de SPM. Uma vez que o efeito de XPM é qualitativamente semelhante ao de SPM é espectável que XPM exacerbe o *chirp* e consequentemente os efeitos de alargamento dos impulsos em sistemas WDM. Caso os dois campos óticos não tenham a mesma intensidade, o alargamento torna-se assimétrico uma vez que o efeito de XPM não terá o mesmo peso do efeito de SPM.

A.3.3. Mistura de Quatro Ondas (FWM)

FWM é uma interação não linear que ocorre na presença de múltiplos comprimentos de onda num meio, levando à geração de novas frequências. Este fenómeno não linear tem também a sua origem na suscetibilidade não linear de terceira ordem ($X^{(3)}$). Considerando o termo de terceira ordem da polarização em (A.3.2), as principais características do FWM podem ser entendidas [40]:

$$P_{NL} = \varepsilon_0 X^{(3)} : EEE \quad (\text{A.3.7})$$

Se quatro campos óticos com frequências de portadoras $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ e linearmente polarizados ao longo do eixo x se propagam ao longo de uma fibra ótica, o campo elétrico total pode ser escrito como [40]:

$$E = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{j=1}^4 E_j e^{i(k_j z - \omega_j t)} + c.c \quad (\text{A.3.8})$$

onde a constante de propagação (k_j) é dada por $k_j = n_j \omega_j / c$, n_j é o índice de refração, e onde se assume que todas as ondas se propagam na mesma direção.

Usando a expressão (A.3.8) em (A.3.7), e expressando-se P_{NL} da mesma forma que E usando:

$$P_{NL} = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{j=1}^4 P_j e^{i(k_j z - \omega_j t)} + c.c. \quad (\text{A.3.9})$$

é possível verificar que cada P_j ($j=1$ to 4) é constituído por um grande número de termos envolvendo o produto de três campos óticos. Por exemplo, para P_4 temos:

$$P_4 = \frac{3\varepsilon_0}{4} X_{xxxx}^{(3)} [|E_4|^2 E_4 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2) E_4 + 2E_1 E_2 E_3 e^{i\theta_+} + 2E_1 E_2 E_3^* e^{i\theta_-} + \dots] \quad (\text{A.3.10})$$

onde θ_+ e θ_- são definidos como:

$$\theta_+ = (k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z - (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4)t \quad (\text{A.3.11})$$

$$\theta_- = (k_1 + k_2 - k_3 - k_4)z - (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4)t \quad (\text{A.3.12})$$

Os primeiros quatro termos contendo E_4 em (A.3.10) são responsáveis pelos efeitos de SPM e XPM. Os restantes termos resultam do efeito de FWM. Assim, significativo FWM ocorre apenas se o desfasamento de fase entre E_4 e P_4 quase se extinguir [40].

Em (A.3.10) podem ser observados dois tipos de termos relativos ao efeito de FWM. O termo contendo θ_+ corresponde ao caso em que três fótons transferem a sua energia para um único fóton à frequência $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$. O termo contendo θ_- corresponde ao caso em que dois fótons a frequências ω_1 e ω_2 são aniquilados com a criação simultânea de dois fótons a frequências ω_3 e ω_4 , tais que [40]:

$$\omega_3 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_2. \quad (\text{A.3.13})$$

O requisito de correspondência de fase para este processo ocorrer é:

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_3 + k_4 - k_1 - k_2 = \\ &= (n_3\omega_3 + n_4\omega_4 - n_1\omega_1 - n_2\omega_2)/c = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.3.14})$$

Este requisito é relativamente fácil de satisfazer no caso específico em que $\omega_1 = \omega_2$. Fisicamente, ele manifesta-se como uma onda forte na bomba ω_1 que cria duas bandas laterais simétricas a frequências ω_3 e ω_4 com um deslocamento de frequência dado por: [40]

$$\Omega_S = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1 \quad (\text{A.3.15})$$

onde é assumido que $\omega_4 > \omega_3$.

Em geral, considerando M canais originais de um sistema WDM, o número de possíveis produtos (N) devido ao efeito de FWM é dado por: [51]

$$N = \frac{1}{2}(M^3 + M^2) \quad (\text{A.3.16})$$

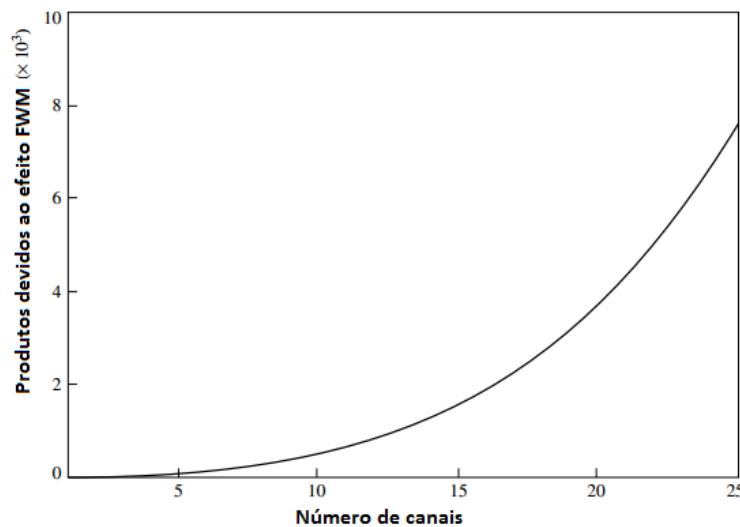


Figura A.3.2 – Número de possíveis termos devidos a FWM em relação ao número de canais [51]

Se os canais de um sistema WDM forem igualmente espaçados, as ondas geradas devidas ao efeito FWM vão ter o mesmo espaçamento e um grande número delas vai coincidir exatamente com os canais originais ou com outros. Esta possibilidade é ilustrada na Figura A.3.3, onde os produtos devidos ao efeito de FWM são representados considerando a existência de três canais. Neste caso, apesar de ser expectável a geração de nove ondas, apenas quatro novas frequências foram realmente geradas. [51]

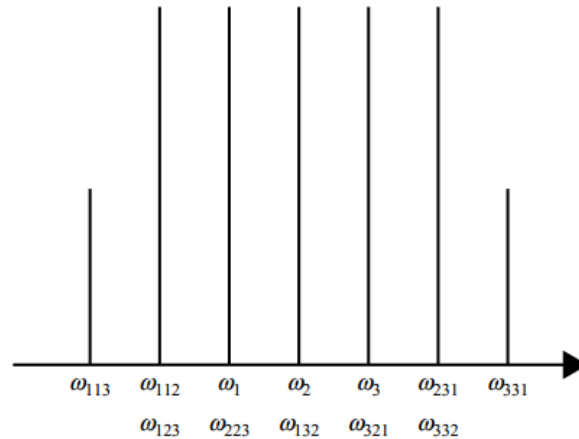


Figura A.3.3 – Termos devidos ao efeito de FWM para três canais igualmente espaçados na frequência [51]

Por outro lado, quando os canais não são igualmente espaçados, a maioria dos componentes devidos ao FWM situam-se entre os canais e levam a interferência para fora da banda. Em ambos os casos, a performance do sistema é degradada uma vez que há perda de potência dos canais, mas a interferência coerente degrada muito mais severamente a performance do sistema. [51]

A.3.4. Difusão Estimulada de Raman (SRS)

Ver secção 3.2.

A.3.5. Difusão Estimulada de Brillouin (SBS)

SBS pode também transferir energia de canais de alta frequência para canais de baixa frequência. O deslocamento de frequência experimentado pela luz é muito pequeno ($\sim 10\text{GHz}$) e o excesso de energia aparece sob a forma de um fonão acústico. Como consequência, parte significativa da luz incidente passa a propagar-se em sentido contrário. Outra característica importante é que o espectro do ganho de Brillouin é muito estreito ($<100\text{ MHz}$) em contraste com o ganho de Raman que se estende até aos THz. [37]

O efeito de Brillouin é assim caracterizado por ser um efeito de canal único, responsável por estabelecer um limite superior à quantidade de energia ótica que pode ser utilmente lançada na fibra. Potências inferiores ao chamado limiar de Brillouin proporcionam um aumento linear da potência no recetor. No entanto, quando este limiar é excedido, a luz retro difundida aumenta acentuadamente e a potência no recetor satura. [37]

O limiar de Brillouin é definido como a potência de entrada para a qual a potência refletida de Stokes iguala a potência do sinal transmitido, e é dado por: [52]

$$P_{th} = 21 \frac{b A_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_S}{\Delta\nu_B} \right) \quad (\text{A.3.17})$$

onde $\Delta\nu_S$ é a largura de linha da fonte, $\Delta\nu_B$ a largura de linha de Brillouin, A_{eff} a área efetiva de fibra, L_{eff} o comprimento efetivo de fibra e g_B o ganho de Brillouin.

Referências

- [1] “Fibre capacity limitations in access networks”, Report of Ofcom, Final Report, 13 Janeiro 2010 [Em linha]. Disponível em: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/research/technology-research/fibre.pdf>
- [2] L. G.Kazovsky, N. Cheng, W.-T. Shaw, D. Gutierrez, and S.-W. Wong, *Broadband Optical Access Networks*. Wiley, 2011.
- [3] Hajduczenia, M.; da Silva, H.J.A., “Next generation PON systems – Current status”, *Transparent Optical Networks, 2009. ICTON 2009. pp.1-8*. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5185097>
- [4] Chanclou, P.; Cui, A.; Geilhardt, F.; Nakamura, H.; Nettet, D.; *Network operator requirements for the next generation of optical access networks*. Vol.26, no.2, pp.8-14. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6172269&isnumber=6172264>
- [5] Elbers, J.-P.; *Optical access solutions beyond 10G-EPON/XG-PON, Optical Fiber Communication (OFC)*, National Fiber Optic Engineers Conference, 2010. pp. 1-3, 21-25 Março 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5465267&isnumber=5465158>
- [6] DSLAM.BIZ, PON – Passive Optical Networks. [Em linha]. Disponível em: <http://www.dslam.biz/2012/05/pon-passive-optical-network.html>
- [7] IEEE, 802.3ah (2004), *Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment*
- [8] Fabio Neri; Jorge M. Finochietto. *Passive Optical Networks – Tutorial*. [Em linha]. Disponível em: http://materias.fi.uba.ar/7543/download/PON_e1-jorge_finochietto.pdf
- [9] Concil Europe. *FTTH Handbook*, 4ª Edição. [Em linha]. Disponível em: <http://www.ftthcouncilmena.org/documents/Reports/FTTH-Handbook-2011-4thE.pdf>
- [10] ITU-T Recommendation G.984.1 (2008), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General characteristics*.
- [11] ITU-T Recommendation G.984.2 (2003), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*.
- [12] ITU-T Recommendation G.984.2 (2008), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification*.
- [13] ITU-T Recommendation J.81 (1993), *Transmission of component-coded digital television signals for contribution-quality applications at the third hierarchical level of ITU-T Recommendation G.702*.
- [14] ITU-T Recommendation G.984.4 (2008), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification*

- [15] Huawei. GPON-Fundamentals. *Technical Team from FTTH Marketing Departement*. [Em linha]. Disponível em: http://www.slideshare.net/mansoor_gr8/G-PON-fundamentals-8894877
- [16] ITU-T Recommendation G.984.5 (2007), *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Enhancement band*.
- [17] Ragheb, A.M.; Fathallah, H., "Performance analysis of next generation-PON (NG-PON) architectures", *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies*, 2011, pp.339-345, 19-21 Dec.2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6149766&isnumber=6149763>
- [18] Yuanqiu Luo, Huawei. *FTTH Council: Next Generation G-PON*. [Em linha]. Disponível em: <http://www.ftthcouncil.org/sites/ftthcouncil.org/files/YanquiLuo-Huawei.pdf>
- [19] ITU-T Recommendation G.987.1 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*.
- [20] ITU-T Recommendation G.987.2 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*
- [21] ITU-T Recommendation G.987.2 (2010), *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*
- [22] Ma, Yiran; Qian, Yinbo; Peng, Guikai; Zhou, Xiaoping; Wang, Xiaomu; Yu, Jingwen; Luo, Yuanqiu; Yan, Xuejin; Effenberger, Frank; , "Demonstration of a 40Gb/s time and Wavelength Division Multiplexed passive optical network prototype system," *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pp.1-3, 4-8 March 2012. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6192266&isnumber=6191948>
- [23] Corning. *The importance of international standards in the evolution of the telecommunications networks*, Junho 2004. Disponível em: <http://www.corning.com/WorkArea/linkit.aspx?LinkIdentifier=id&ItemID=7829>
- [24] Jean-Marie Fromenteau, Vanessa G. Diaz. *Smart Optical Fibre Infrastructure*, Advanced Low Loss Single-Mode-ITU-T G.652.D Compliant Optical Fibre, Janeiro 2012. Disponível em: <http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=49845>
- [25] Lightwave. *Scaling FTTH for rising bandwidth needs*. Disponível em: <http://www.lightwaveonline.com/editorial-guides/2012/08/anritsu.whitepaperpdf.render.pdf>
- [26] "Fibre capacity limitations in access networks" , Report for Ofcom, Janeiro 2010. Disponível em: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/research/technology-research/fibre.pdf>
- [27] Ryf, R.; Su, Y.; Moller, L.; Chandrasekhar, S.; Xiang Liu; Neilson, D.T.; Giles, C.R.; , Wavelength blocking filter with flexible data rates and channel spacing, *Lightwave Technology*, vol. 23, no.1, pp.54-61, Janeiro 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1377431&isnumber=30066>

- [28] ITU-T Recommendation G.983.3 (2001), *A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation*
- [29] Jones, G.A.; Defilippis, J.M.; Hoffmann, H.; Williams, E.A.; *Digital Television Station and Network Implementation, Proceedings of the IEEE*, vol.94, no. 1, pp. 22-36, Janeiro 2006. Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1566618&isnumber=33232>
- [30] Batista, C.E.C.; de Araujo, T.M.U.; Omaia, D.; dos Anjos, T.C.; de Castro, G.M.L.; Brasileiro, F.V.; de Souza Filho, G.L.; , TVGrid: A Grid Architecture to use the idle resources on a Digital TV network, *Cluster Computing and the Grid, 2007. CCGRID 2007. Seventh IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid*, pp.823-828, 14-17 Maio 2007. Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4215458&isnumber=4215349>
- [31] W. Fischer, *Digital video and audio broadcasting technology*, 2ª Edição. Springer: 2008;
- [32] Hervé Benoit, *Digital Television: Satellite, Cable, Terrestrial, IPTV, Mobile TV in the DVB Framework*, 3ª Edição. Elsevier: 2008.
- [33] Kalyvas, M.; Bintjas, C.; Avramopoulos, H.; Boskovic, A., "Experimental and Theoretical Investigation of Nonlinear-Crosstalk in SCM-WDM CATV Systems", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 35, pp. 413-430, 2004, Springer Netherlands.
- [34] F. Amaya, A. Cárdenas, I. Tafur. (2011) "Modeling the video distribution link in the Next Generation Optical Access Networks", *Journal of Physics*, Cong. Ser. 274 012012 [Em linha]. Disponível em:
http://iopscience.iop.org/1742-6596/274/1/012012/pdf/1742-6596_274_1_012012.pdf
- [35] Phillips, M.R.; Ott, D.M., "Crosstalk due to optical fiber nonlinearities in WDM CATV lightwave systems," *Lightwave Technology*, vol.17, no.10, pp.1782-1792. Outubro 1999: Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=793751&isnumber=17233>
- [36] Kim, H.; Han, K.H.; Chung, Y.C.; "Performance limitation of hybrid WDM systems due to Stimulated Raman Scattering", *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.13, no.10, pp.1118-1120, Outubro 2001. Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=950754>
- [37] Govind P.Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Edition 4. New Jersey: A John Wiley & Sons, 2010.
- [38] Chraplyvy, A.R., "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", *Lightwave Techonology*, vol.8, no.10, pp.1548-1557, Outubro 1990. Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=59195&isnumber=2154>

- [39] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan and Galen H. Sasaki, *Optical Networks-A Practical Perspective*, Ed. 3. Elsevier: Morgan Kaufmann, 2010.
- [40] Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Edition 3. Rochester: Academic Press, 2001.
- [41] Raughuwanshi, S.K.; Talabattula, S.; "Asymmetric Pulse Distortion due to Pulse walk-off Phenomena in Wide-Band DWDM Raman Amplification Systems"; International J. of Engg. Research & Indu. Appls. (IJERIA), Vol.1, No. III, 2008.
- [42] Coppinger, F.; Piehler, D., "RF video overlay in an Ethernet passive optical network", *Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference. OFC 2006*. Pp.3, 5-10 Março 2006. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1636787&isnumber=34305>
- [43] A. Teixeira; "Cross-talk sources in fiber optic Access networks comprising video overlay", 2012.
- [44] Mao, E.; Jiang, W. "Impact of nonlinear optical crosstalk on 10GEPON architecture", JDSU, June 2007.
- [45] VPI transmission Maker™ Optical Systems, <http://www.vpisystems.com/>
- [46] Shafik, R.A.; Rahman, S.; AHM Razibul Islam;; "On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics", *Electrical and Computer Engineering, 2006. ICECE '06*. pp. 408-411. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4178493>
- [47] K. Thyagarajan and Ajoy Ghatak, *Guided Wave Optical Components and Devices: Basics, Technology, and Applications: Chapter 6*. Rochester: 2006.
- [48] Gerd Keiser, *Optical Fiber Communications*, Edition 3. McGraw-Hill, 2000.
- [49] Jong-Hyung Lee, *Analysis and Characterization of Fiber Nonlinearities with Deterministic and Stochastic Signal Sources*. pp.6-14, February 2000.
- [50] Natalia Grib, *Supercontinuum Generation* [Em linha]. pp.17. Disponível em: http://web.uvic.ca/~steugrp/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=group_meeting:supercontinuum_generation-final.pdf
- [51] Mário F. S. Ferreira, *Nonlinear Effects in Optical Fibers*, Edition 1. New Jersey: A John Wiley & Sons
- [52] A. Kobayakov, M. Sauer, and D. Chowdhury, "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers," 2009